

IMPRESIÓN 3D: EVALUACIÓN MECÁNICA DE POLÍMEROS ECOLÓGICOS



Trabajo de Fin de Grado

Tutora: Reyes Rodríguez García

Grado en Fundamentos de Arquitectura

ETSA de Sevilla

Curso 2017-2018

ÍNDICE

	Páginas
AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN.....	2
¿QUÉ ES LA IMPRESIÓN 3D?	
Introducción histórica.....	4
Técnicas de fabricación de objetos tradicionales	5
Fabricación aditiva.....	7
Formas geométricas y aplicaciones generales.....	10
Cambio de mentalidad en procesos de producción.....	13
MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D	
Introducción.....	14
Tipos de plásticos.....	15
OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	
OBJETIVOS.....	21
METODOLOGÍA:	
Selección de materiales	22
Definición de ensayos	25

Fabricación de probetas:.....	28
Parámetros variables	29
Parámetros constantes	35
Fase experimental. Procedimiento.....	42
ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
Temperaturas de fusión	
Calidades de impresión	
Comparación entre distintos materiales	50
CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	54

AGRADECIMIENTOS

Después de este intenso periodo de aprendizaje, quería comenzar mi trabajo fin de grado agradeciendo a todas las personas que me han apoyado en este proceso, del cual he aprendido no solo en el campo científico, también a nivel personal. Me gustaría empezar dando las gracias a *Reyes Rodríguez*, mi tutora, por su inestimable y atento seguimiento en todo el proceso, tanto de escritura como de laboratorio y a todo el personal que componen el equipo de laboratorio de construcciones arquitectónicas.

También quisiera dar las gracias a *Carmelo Sau*, director de la empresa de filamentos A3DP, por su colaboración en el aporte de 8 bobinas de 1kg de material para poder realizar todos los ensayos.

Del mismo modo, mis agradecimientos a *Braydon Moreno*, Cofundador de la empresa ROBO 3D, por el aporte de su impresora Robo R1+, tan necesaria para poder imprimir gran parte de las pruebas realizadas.

Desde luego, me gustaría agradecer a toda la comunidad 3D, ya que se está permitiendo conocer y desarrollar más esta tecnología.

Para terminar, mi más profundo agradecimiento a mi familia y amigos, aquellas personas que siempre en estos años de grado han estado apoyándome en todo momento.

RESUMEN

El mundo de la impresión 3d está experimentando un crecimiento exponencial, tanto, que ya se habla de una nueva revolución industrial (1). Después de la liberación de las patentes, el programa de código abierto está permitiendo a más personas introducirse en este mundo (2), debido a la consecuente disminución de precio, el método de impresión más popularizado es el de deposición fundida. Pero, ¿Somos conscientes de lo perjudicial que puede ser para el planeta si no seleccionamos correctamente los materiales utilizados con esta tecnología? Las alarmas aumentan conforme vemos estudios como los realizados en el océano pacífico, con datos que reflejan desechos equivalentes a 79.000 toneladas de residuos compuestos por plásticos en un 99%, con una extensión de 1.6 millones de km². Cada año, 8 millones de toneladas de plásticos terminan en los océanos con la contaminación que eso supone.

El plástico marino puede persistir en las aguas superficiales del mar y eventualmente acumularse en áreas remotas de los océanos del mundo, con una estimación de degradación de 100 años.(3)

Estos datos hablan por sí solos. Es cierto que los plásticos han demostrado su utilidad, resistencia y versatilidad, aunque no podemos seguir así. En la situación actual con un rechazo a los plásticos tradicionales totalmente justificado, existe una solución: plásticos provenientes de fuentes renovables y biodegradables no solo para desempeñar las funciones realizadas hasta ahora, también para la inclusión en nuevos procesos de fabricación. Es importante conocer los distintos tipos de plásticos tanto biodegradables como no, para la posterior implementación con la nueva tecnología de impresión 3d de una manera adecuada y respetuosa con el medio ambiente.

El PLA es un gran ejemplo de ello, es biodegradable e independiente de aquellos recursos no renovables como el petróleo y cuya obtención proviene de recursos agrícolas renovables. Por tanto, esta ventaja, implica la disminución de volúmenes de residuos sólidos. (4)

Respecto al uso de plásticos con impresión 3d, las aplicaciones se están expandiendo a cualquier ámbito, llegando incluso a emplearse en arquitectura, construyendo pabellones y viviendas efímeras entre otros (5).

Una vez se crea un objeto la principal duda es ¿Qué propiedades mecánicas tiene ese objeto? ¿Puedo conocer su comportamiento exacto para así aplicarlo de mejor manera? Dentro de la gran variedad de termoplásticos actuales en el mercado, existen varios

procedimientos para la obtención de datos relacionados con el comportamiento mecánico, pero estos datos siempre están referidos a comportamiento mecánico a tracción. En la gran mayoría de situaciones, cuando desarrollamos un objeto, además de tracciones, está sometido a compresiones, compresiones que hasta el momento no podemos controlar por la inexistencia de estudios al respecto.

En este documento, mediante una metodología de trabajo adecuada, seleccionaremos cinco materiales para estudiar su comportamiento a compresión.

Cuando comenzamos el estudio, la mayor preocupación era la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso de impresión, ya que existen muchos parámetros que se pueden controlar con un gran número de variables y combinaciones posibles.

Se estudiaron los parámetros más relevantes, para así conocer los más representativos. Para poder realizar esta investigación se seleccionaron como parámetros principales, la calidad de impresión y la temperatura de impresión, manteniendo el resto de parámetros constantes. Una vez que se deciden las combinaciones posibles para la realización del estudio, el objetivo es analizar el comportamiento de cada uno de los materiales seleccionados tanto por separado como entre sí. De esta forma se podría seleccionar el material óptimo respecto a la resistencia mecánica a compresión de una figura impresa en 3d. Una vez se detecte la mayor de las resistencias posibles con los materiales seleccionados, se comparará el comportamiento de estos materiales con los comúnmente usados en arquitectura, de forma orientativa, para así concluir con las posibles aplicaciones de esta nueva tecnología en este sector.

¿QUÉ ES LA IMPRESIÓN 3D?

INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Hoy en día y cada vez más, se muestran campañas de publicidad y de integración de las impresoras en cualquiera de nuestros entornos laborales. El desconocimiento sobre esta tecnología para la mayoría de la población hace pensar que se trata de algo nuevo, que se está implantando justo en este momento, aunque en realidad no es así.

La impresión 3d tuvo sus inicios hace más de 25 años, aunque durante los primeros años de su creación su uso era exclusivamente industrial para prototipado rápido. En el mundo industrial se usa la denominación AM (Additive Manufacturing = Fabricación aditiva).

La primera impresora fue la 3D SLA -250 de la empresa 3D Systems a finales del año 1988, funcionaba por estereografía, que es una técnica que creaba objetos físicos a partir de sucesivas capas de material sensible a los rayos ultravioleta. Esto supuso un gran avance para las industrias. (6)

Ese mismo año, la compañía Stratasys ya estaba en el desarrollo de las impresoras que hoy en día conocemos de tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) que sería patentado en 1989, hasta el año 1993 no apareció el proceso 3DP (Impresión tridimensional), aunque hasta el año 1996 no aparecieron las primeras denominadas " impresoras 3d ". Estas impresoras fueron la Genesys de Stratasys (7), la Actua 2100 de 3Dsystem y la Z402 de Z corporation. Hasta el año 2007 estas impresoras no estaban a disposición de cualquier usuario, solo el ámbito de la industria usaba estos recursos. En este mismo año en Holanda se creó un servicio online de impresión 3d a particulares y se empezó a investigar al respecto. En esta misma línea de tiempo se comenzó con el movimiento RepRap, que consiste en la investigación sobre los componentes y funcionamientos de las impresoras con código abierto de todo el material para que cualquier persona pueda acceder a la documentación, estudiarla y aportar sus mejoras. La idea es que entre todos consiguiéramos hacer crecer esta tecnología. (2)

Este crecimiento, se observa en los últimos estudios de 2011 donde se llegó a las 23.265 ventas, frente a las del 2008, 355 impresoras de la empresa Stratasys. Un aumento exponencial, como se observa en la *Figura 1*.

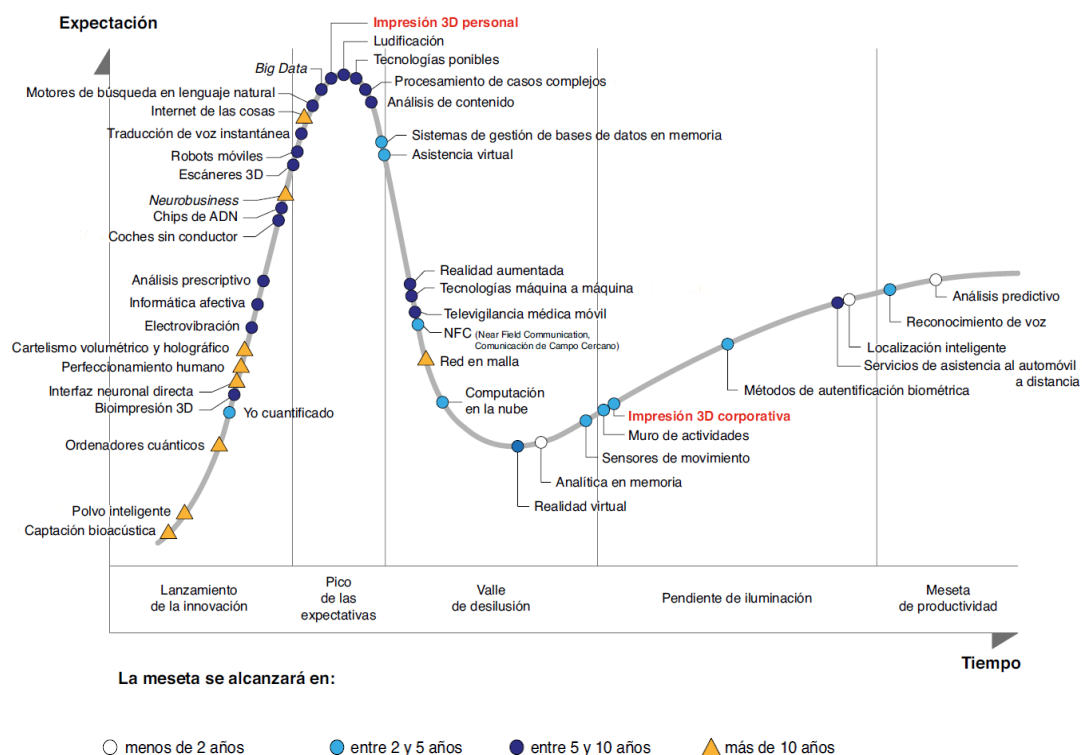


Fig.1. La impresión 3D, máxima tendencia. Fuente: Compañía de investigación Gartner.

Debido a que el movimiento de código abierto ha permitido el acceso a más usuarios, los costes de las impresoras 3d se han visto reducidos durante los últimos años. Esto es siempre positivo ya que, actualmente, casi cualquier persona puede adquirir una impresora 3d, lo que permite que se investigue más sobre esta tecnología haciéndola evolucionar.

TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE OBJETOS TRADICIONALES

Durante bastantes años, el desarrollo y fabricación de diversas piezas se ha conseguido mediante tres técnicas principales: sustracción, combinación o deformación.

- **Sustracción:** consiste en eliminar materia mediante pulido, tallado, fresado hasta conseguir la pieza final.

(Fig. 2)

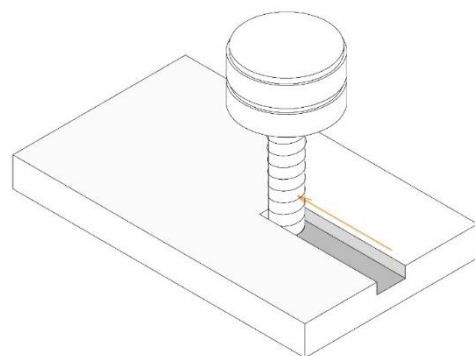


Fig.2. Sustracción mediante fresado. Fuente: Elaboración propia.

- **Combinación:** se consigue obtener la pieza mediante la combinación de varios materiales como por ejemplo los tejidos. (Fig. 3).

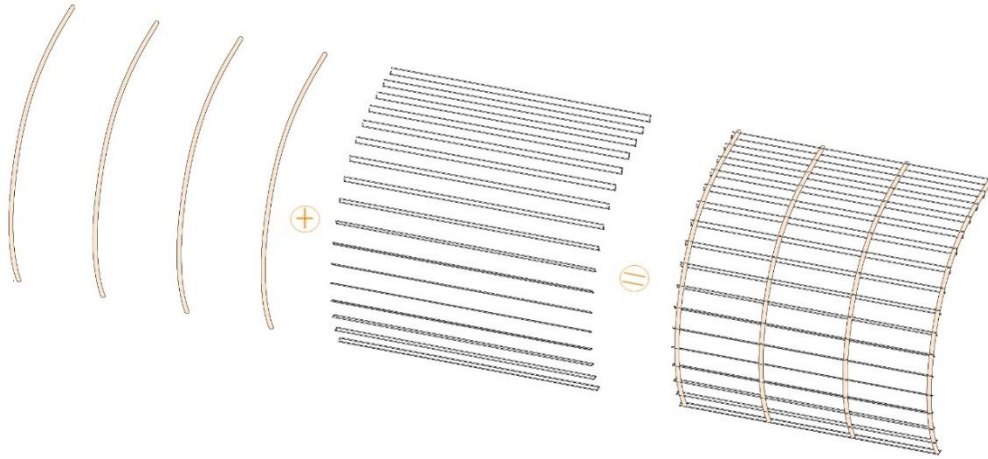


Fig.3. Combinación. Fuente: Elaboración propia.

- **Deformación:** Se consigue obtener la pieza mediante el moldeo, plegado de un objeto inicial hasta llegar al resultado final. (Fig. 4).

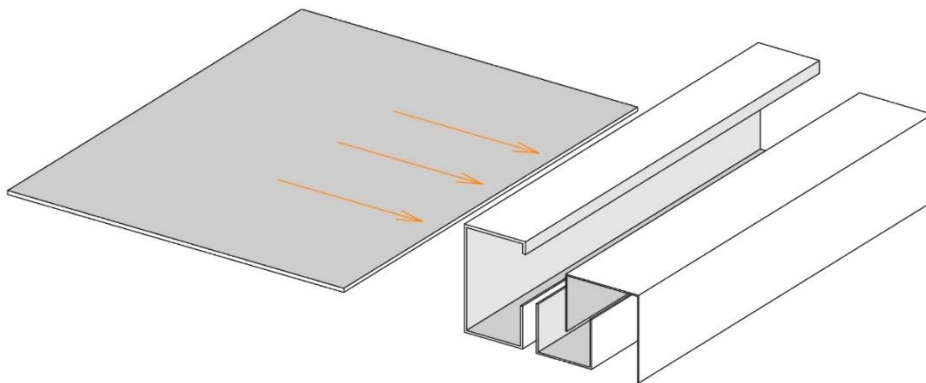


Fig.4. Plegado. Fuente: Elaboración propia.

La impresión 3d cambia esta realidad, ya no es necesario realizar la combinación de muchos de estos procedimientos para obtener una pieza funcional ya que todo se puede desarrollar con una maquina denominada impresora 3d.

FABRICACIÓN ADITIVA

La impresión 3d se entiende como un proceso de adición de materia, por lo que se denomina **fabricación "aditiva"**, también conocida como Fused Filament Fabrication o FFF. Esta materia se deposita por capas, las cuales, al solidificarse, crean el objeto que hayamos diseñado previamente en cualquier programa de modelado 3D capaz de exportar a .stl (Standard Tessellation Language) (8) (6). (Fig. 5)

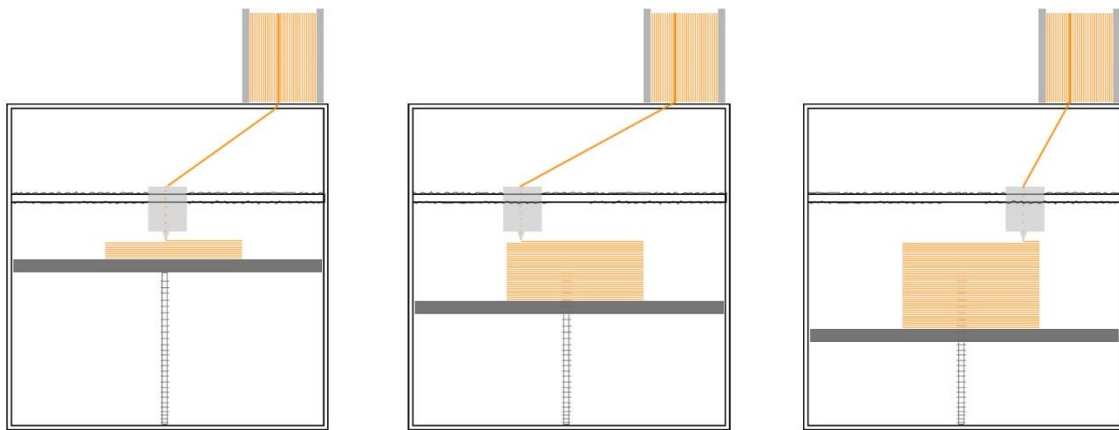


Fig. 5. Proceso de impresión 3d. Fuente: Elaboración Propia.

Componentes impresora 3d

Una impresora 3d está compuesta por motores, rodamientos, cableado, placa electrónica, extrusor, entre otros componentes. Con la combinación de todos los componentes (Fig. 6), es capaz de traducir un modelo 3d generado por un programa llamado laminador (divide en capas la figura en 3d) a un objeto físico (Fig. 7). El volumen de impresión es la principal causa de la diferencia de precio entre las distintas impresoras del mercado. Las impresoras usualmente tienen un volumen de impresión de 200x200x200 (B x L x H) mm mientras que las industriales pueden llegar a tener un volumen de 1000 x 1000 x1000.

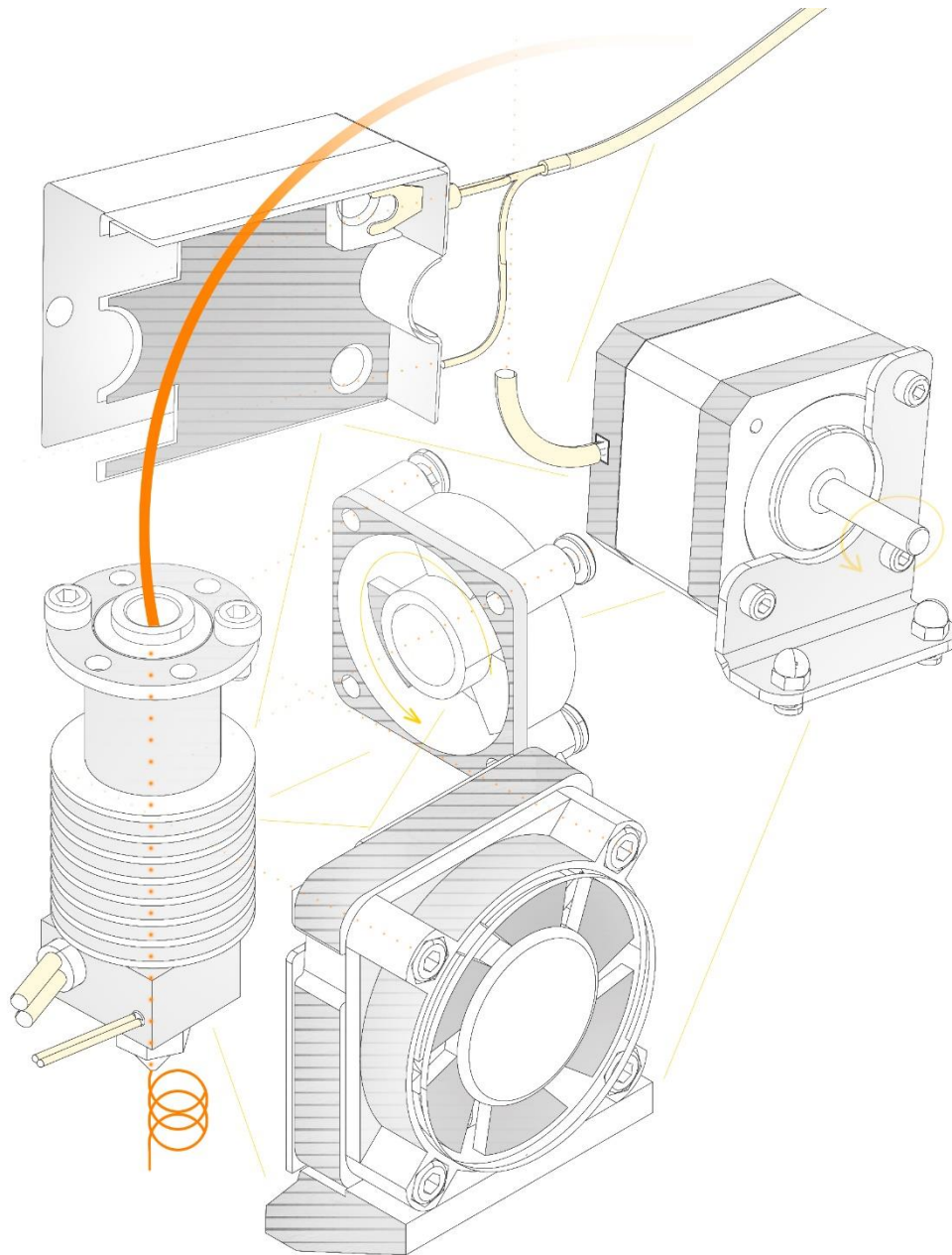


Fig. 6: Componentes impresora 3d. Fuente: Elaboración propia.

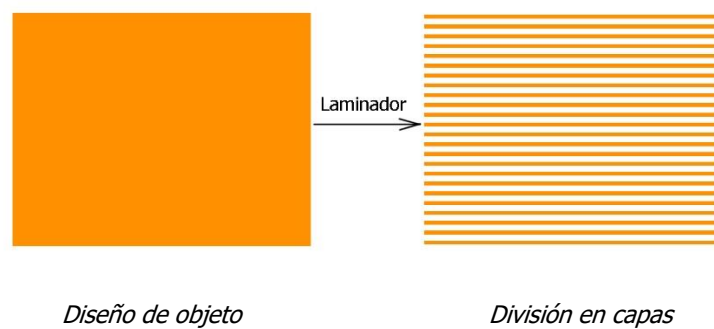


Fig. 7. Laminador. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran fotografías de diferentes tipos de impresoras, además, estas, son las que empleamos en la realización de las probetas. (Fig. 8 a 10).



Fig. 8. Impresora Robo R1+. Fuente: Imagen del autor.



Fig. 9. Impresora Hephastos 2 bq. Fuente: Imagen del autor.

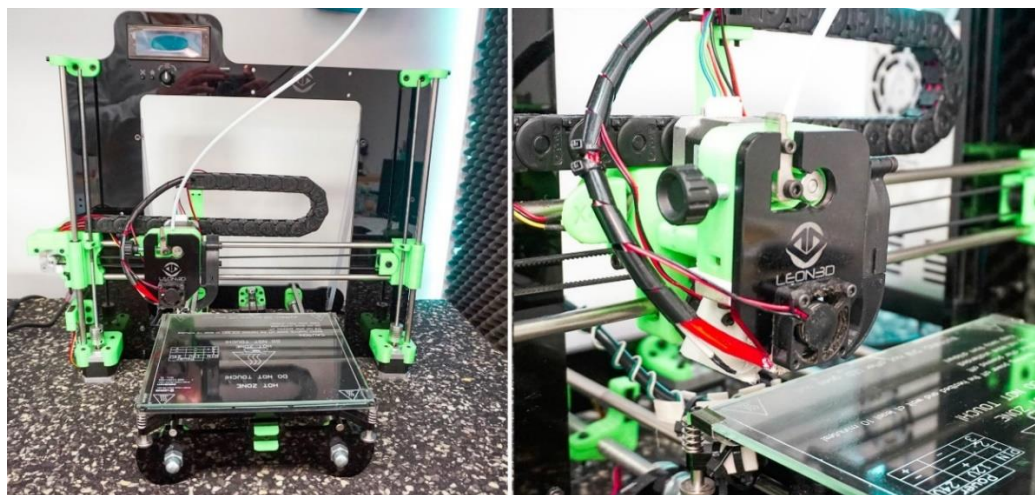


Fig. 10. Impresora Legio 3d Fuente: Imagen del autor

FORMAS GEOMÉTRICAS Y APLICACIONES GENERALES

La impresión 3d tiene la gran ventaja de permitir desarrollar prácticamente cualquier tipo de geometría, por muy compleja que pueda parecer. Todo aquello que tengamos en nuestra mente puede ser obtenido como modelo físico y esto es algo revolucionario. Materializar geometrías que hasta hace unos años era imposible de desarrollar por su gran complejidad (*Fig. 11*). Las aplicaciones también se multiplican ya que abarcan todos los campos. Esta tecnología puede ser aplicada tanto para arquitectura, ingeniería, diseño del producto, medicina, educación, entre otras áreas de conocimiento.

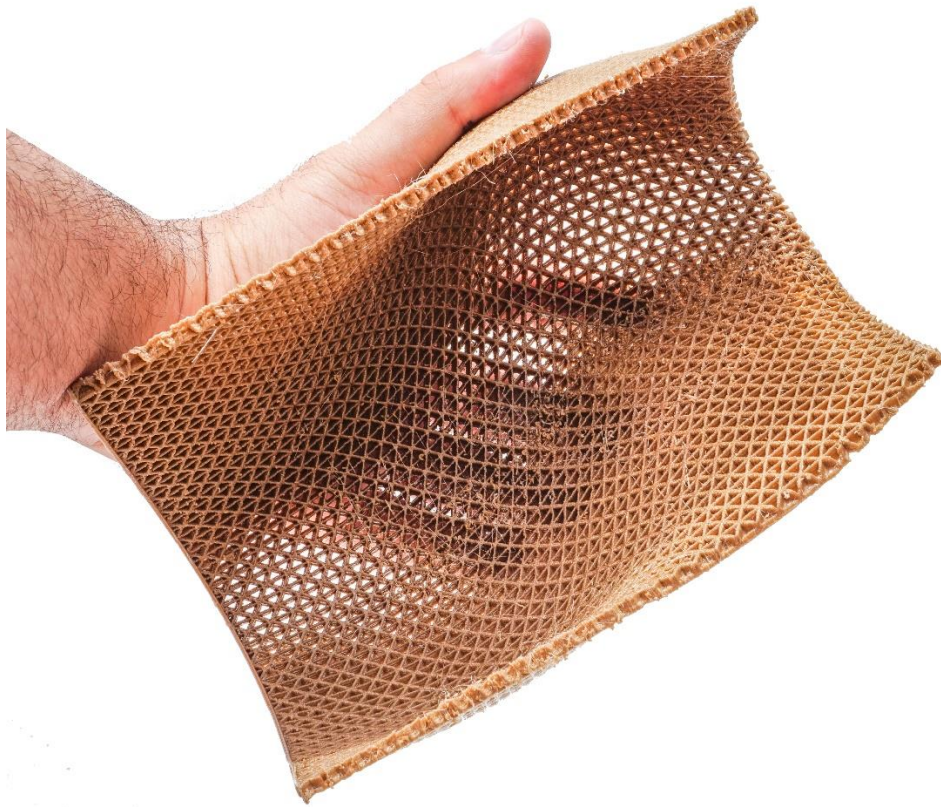


Fig. 11. Fuente: Imagen del autor.

Todo ello conlleva a ver la sustitución de muchos de los materiales o técnicas actuales; incluso, en estos años, se está implementando en medicina ya que podemos obtener modelos exactos de huesos, con materiales biocompatibles, por lo que la posterior integración es 100 % exacta. También permite realizar prótesis, como las que pueden ver en la *Figura 12*, mejorando la calidad de vida de las personas.



Fig. 12. Prótesis SuperGiz. Fuente: Imagen del autor.

La prótesis Supergiz es un invento que ofrece una mejor calidad de vida a aquellos niños que presentan malformaciones o amputaciones de su extremidad distal del miembro superior. Gracias a los gadgets, tienen una autonomía acorde a la actividad que se quiera realizar, tales como: beber, comer, montar en bicicleta, etc. (9)

También en el mundo de la moda, en la que empresas como Recreus, con su desarrollo y aplicaciones de su material flexible, han conseguido crear formas geométricas nunca antes vista, con filamentos tan suaves y flexibles que parecen tela (10). (Fig. 13).



Fig. 13. Filaflex. Fuente: Recreus

Con respecto a la arquitectura, la tendencia se implementa y ya existen empresas que están especializadas en la impresión 3d de edificios, con formas geométricas complejas y con una precisión en la fabricación y montaje actualmente difícil de igualar. Por ejemplo el caso de Dus Architects, un estudio de Ámsterdam especializado en este tipo de producciones. Entre sus proyectos se encuentra una micro casa de 8 metros cuadrados que pretende demostrar cómo la fabricación aditiva puede ofrecer soluciones para vivienda temporal o ayuda en casos de desastre. Cuando la cabina ya no se necesita, se puede destruir y casi todos los materiales se pueden reutilizar (5). (Fig. 14).

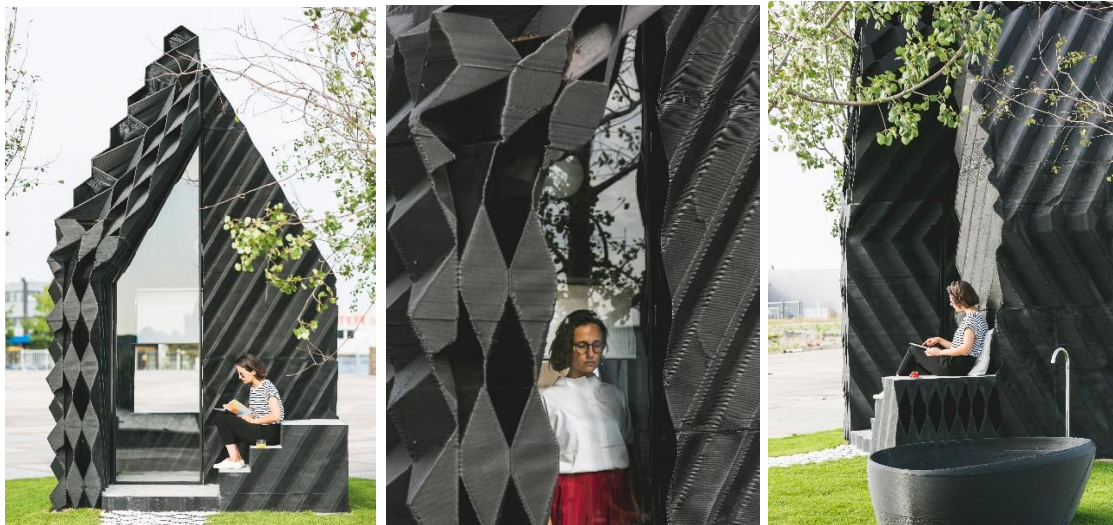


Fig. 14. Micro House. Fuente: Dus architects. www.dezeen.com

Otro proyecto interesante es el desarrollado para el edificio donde se celebraron las reuniones de la union europea, el edificio Mobile Europe. Este proyecto tenía la peculiaridad de crear una fachada impresa en conjunción con una estructura de tejido extensible. Al ser una estructura temporal, conllevó a crear una fachada que fuera 100% reciclable utilizando bioplásticos (11). (Fig. 15)

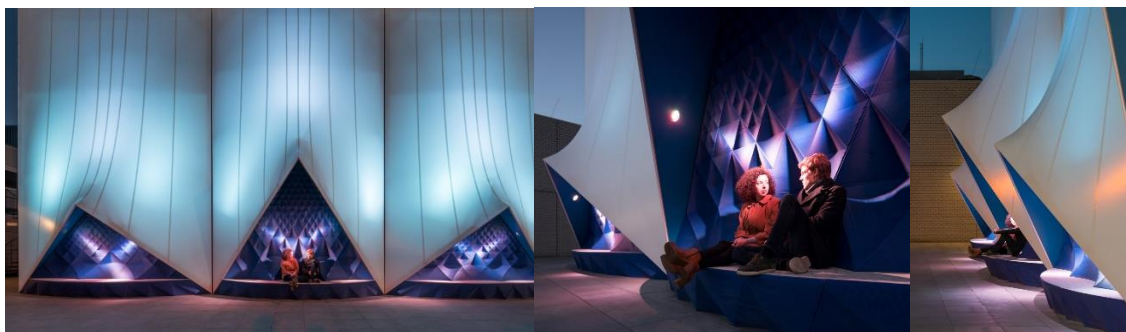


Fig. 15. Fachada con bioplásticos. Fuente : Dus architects. www.dezeen.com

CAMBIO DE MENTALIDAD EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN

La impresión 3d ha llegado para quedarse, cada día son más personas las que tienen impresoras no solo en sus empresas, sino en sus hogares, permitiéndoles elaborar cualquier proyecto, crear piezas únicas y cotidianas (8). Todos sabemos que la gran mayoría de los productos cotidianos que tenemos en los hogares provienen de lugares lejanos del globo, con la contaminación y gastos de recursos que esto conlleva y lo perjudicial que es para el planeta. Esta mentalidad puede cambiar en unos años ya que la impresión 3d reduciría esta contaminación y el excesivo consumismo que vemos hoy en día. Cada persona puede imprimirse lo que justo en ese momento necesite. La idea es elaborar un ciclo cerrado mediante producción local de los productos y no un ciclo abierto que es el modelo actual (Fig.16). ¿Por qué menciono el excesivo consumismo?. Estamos acostumbrados a ir a cualquier centro comercial y comprar lo que queremos, sin necesidad de esperar y esto hace que a veces, adquiramos productos que no son necesarios en ese momento, por el hecho de ser inmediato. La tecnología de impresión 3d lleva un proceso desde el diseño, modelado e impresión que puede durar algunos minutos u horas, esto hace que imprimamos lo que necesitemos, ya que no es inmediato y lleva un trabajo previo que ayuda a la reflexión sobre la necesidad de dicho producto.

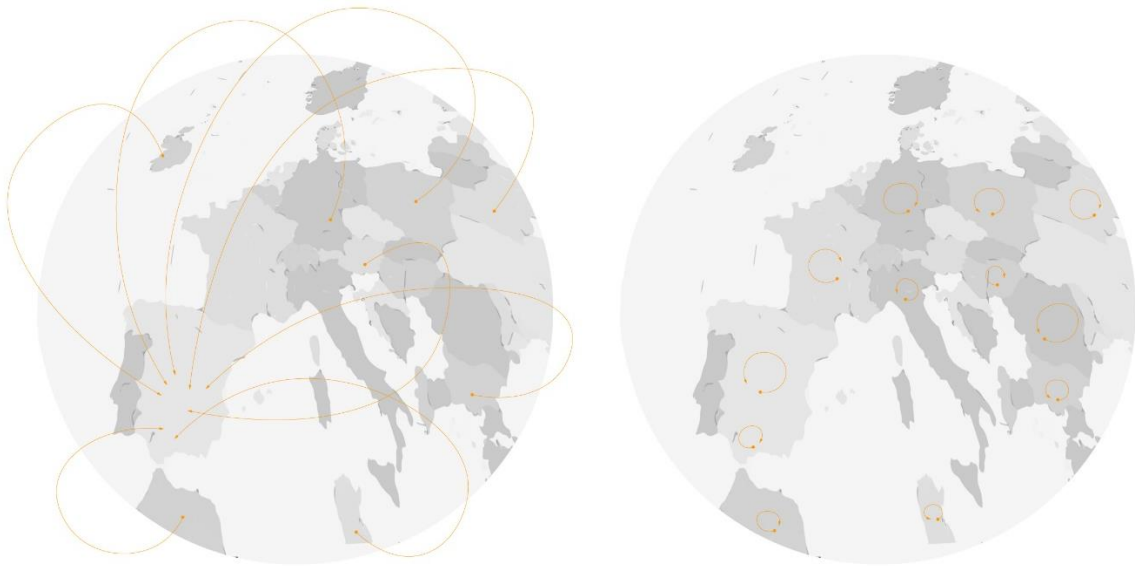


Fig. 16. Ciclo abierto vs ciclo cerrado de producción. Fuente: Elaboración propia

MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D

INTRODUCCIÓN

Todo material utilizado para impresión 3d tiene que permitir fluir por el extrusor. Es decir, el material tiene que tener la capacidad de convertirse en fluido para que el extrusor pueda depositarlo adecuadamente y solidificarse para obtener el resultado final deseado. Estamos viendo más materiales como son por ejemplo la cerámica y el hormigón entre otros, que están incorporándose al mismo procedimiento de obtención de piezas que los plásticos. En el caso de la cerámica el resultado es similar a los utilizados con medios tradicionales aunque con mayor precisión. Una vez impreso, debe de someterse a los mismos procesos que cualquier pieza tradicional como son cocción y barnizado (12). (Fig. 17).



Fig. 17. Impresión con Cerámica. Fuente: www.projets.com

Por el contrario, si hablamos de prefabricación con hormigón, el material impreso se compone por una pasta formada por cemento y otros componentes que quedan aglutinadas en ella. Para que este material pueda ser impreso necesita tener propiedades como:

- Capacidad de ser bombeado, esto conlleva a que el material debe de tener una cierta consistencia que le permita desplazarse hasta la boquilla de impresión.

- Capacidad de resistencia del material para que, una vez depositado, sea capaz de aguantar su propio peso y el inmediatamente correspondiente a las capas superiores sin ser deformado.

Es necesario un material lo suficientemente fluido para poder ser impreso y que al mismo tiempo posea estas capacidades de resistencia. La resistencia a compresión del material dependerá del proceso aunque encontramos unos valores entorno al 80-90% respecto al hormigón con encofrado tradicional (13). (Fig. 18).



Fig. 18. Impresión con hormigón. Fuente: www.elpais.com

TIPOS DE PLÁSTICOS

En el caso de los plásticos, el material se introduce en la impresora en estado sólido y es el extrusor, con su fusor, el que aplica una temperatura determinada para cada tipo de material, que, le permite cambiar de fase a estado líquido. Este cambio de fase a estado líquido (fluido) permite que podamos obtener resultados, ya que un fluido se puede adaptar rápidamente a la forma que necesitemos. Inmediatamente después que el material fluye y pasa por el fusor, se encuentra el ventilador de capa, que utiliza un choque térmico en el material actualmente fluido para solidificarlo y cambiar de estado a sólido (8). No es imprescindible este ventilador de capa (ya que los materiales plásticos también pueden solidificarse a temperatura ambiente) como por ejemplo el PLA (Ácido Poliláctico) o el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) pero el tiempo de solidificación es mayor. Este aporte de refrigeración nos ayuda a solidificar las capas que vamos depositando en nuestra pieza impresa más rápidamente, lo que conllevará un mejor resultado.

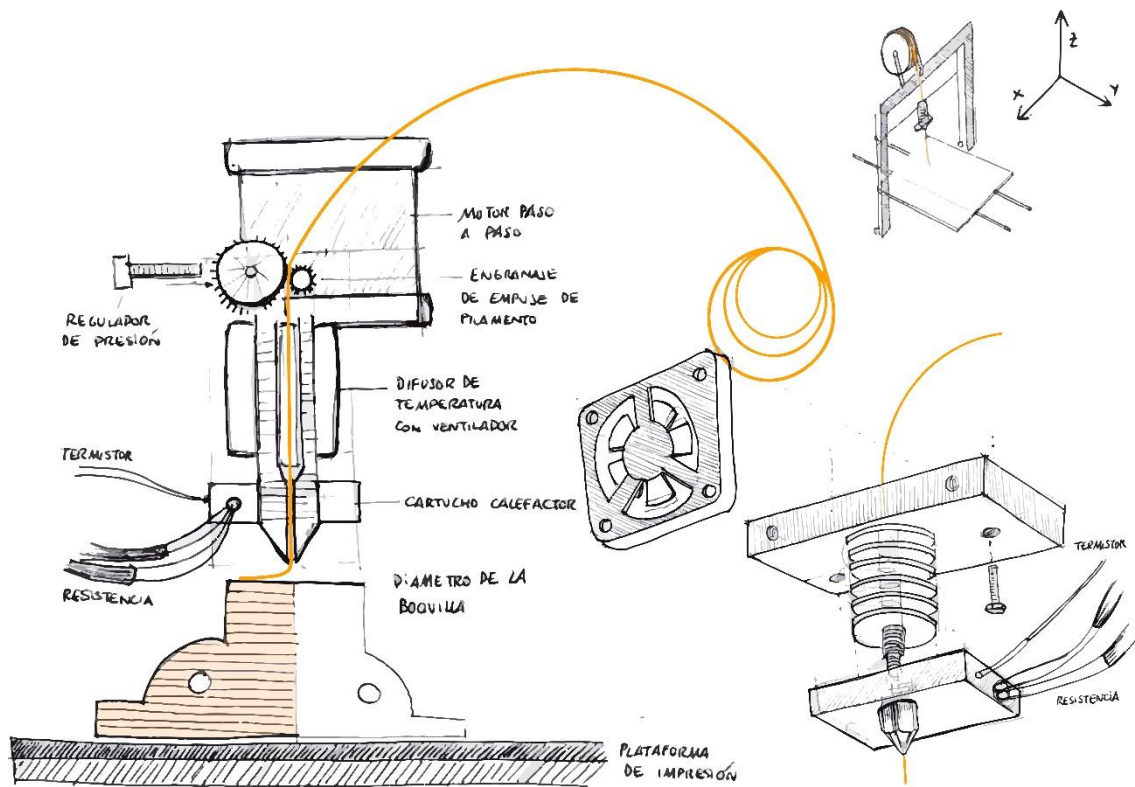


Fig. 19. Fusor. Fuente: Elaboración propia.

Los polímeros, comúnmente denominados Plásticos, se clasifican en naturales y artificiales. Entre los naturales se encuentran los carbohidratos como el almidón y la celulosa mientras que los artificiales son aquellos polímeros sintetizados por el hombre, derivados del petróleo. Los plásticos convencionales son muy estables a las acciones ambientales, con procesos de degradación demasiado largos, mientras que los plásticos basados en polímeros derivados de vegetales, tienen una estructura que puede ser destruida por los microorganismos (4).

En impresión 3d tradicional, se utilizan estos termoplásticos en forma de filamento cuya distribución se realiza en bobinas, normalmente suministrados con diámetros de 1.75mm o 3 mm de diámetro, con una amplia gama de colores.

La regla general usada para los termoplásticos refiere a que cuanto mayor sean sus propiedades mecánicas, requiere una temperatura mayor de fusión y esto hace que sea más difícil de imprimir. Las temperaturas de fusión altas aumentan la probabilidad de la pieza a deformarse durante el proceso de impresión ya que se generan tensiones internas más intensas. (8)

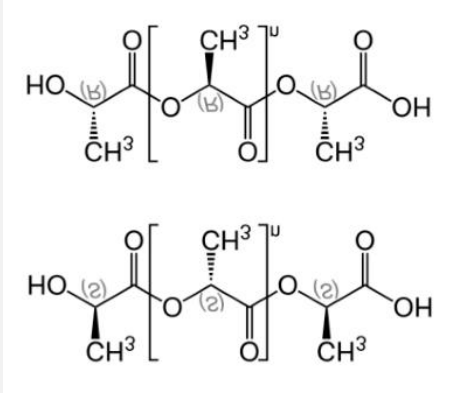
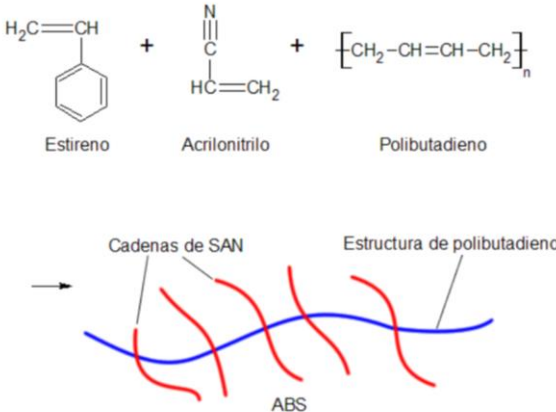
A continuación, se mencionara los materiales usados en las impresoras 3d convencionales:

- **NYLON:** es un termoplástico altamente versátil. Se caracteriza por tener un coeficiente de fricción muy bajo además de ser muy resistente. Es un material con cierta complejidad al imprimir, ya que requiere una temperatura de fusión de 250-260 °C. y una base caliente de al menos 100°C. Esto; limita su uso, ya que no todas las impresoras soportan dichas temperaturas. Material altamente higroscópico por lo que absorbe humedad. Destaca por su flexibilidad y tenacidad. (14)
- **Elastómero (TPE):** es un termoplástico con el que se pueden imprimir piezas de flexibilidad, consistencia y dureza elevada. Las piezas impresas son elásticas y recuperan su forma original tras someterlas a tracción o compresión. Tiene el potencial de ser reciclable ya que pueden ser moldeado y reutilizado como plástico. (14) (15) (16)
- **WOOD:** es una mezcla entre polímero PLA y polvo de madera, se asemeja a la madera. Normalmente, debido a la alta cantidad de partículas de madera usadas en la producción de este filamento, se recomienda usar boquillas de impresión de mayor tamaño para impedir atascos mediante la extrusión de este filamento. La temperatura de impresión, al aumentar o disminuir, podemos cambiar el tono y color del objeto impreso. (14) (15) (16)
- **PVA (Alcohol polivinilo):** es un material de soporte soluble en agua para la impresión 3D por extrusión múltiple. Con una buena estabilidad térmica, PVA es ideal para imprimir modelos complejos que requieren soportes para voladizos grandes, cavidades internas profundas y geometrías intrincadas. Diseñado para una experiencia de impresión 3D sin problemas, ya que proporciona una buena adhesión al PLA, resistente PLA, CPE y nylon. (17)
- **PP (Polipropileno):** termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno. Es un material muy versátil, compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como packaging, industria automotriz, textiles, menaje, medicina, tuberías, etc.

Tiene muy buena procesabilidad, ya que es el material plástico de menos peso específico $0,90 \text{ g/cm}^3$. Además, posee barrera al vapor de agua y buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia. (15)

- **PLA reforzado con fibra de carbono:** es un filamento con composición de PLA y fibra de carbono. Incorpora un porcentaje de hebras de fibra de carbono de entre $5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, que quedan atrapadas entre las capas durante la impresión, dotando de características mecánicas diferentes a las piezas impresas con este filamento. Al ser base de PLA es fácil de imprimir, no tiene *warping* (explicado posteriormente) y no necesita cama caliente. (16)

A continuación se desarrolla unas tablas comparativas con las principales características de los materiales seleccionados para los ensayos.

	Descripción/ características	Singularidades	Estructura	Aplicaciones
<p>PLA (Ácido Poliláctico)</p>	<p>Termoplástico de origen natural biodegradable, está compuesto del ácido poli láctico que se obtiene del almidón de maíz, raíces de tapioca y caña de azúcar. La textura final no es tan suave como la del ABS. (14) (15). Es uno de los plásticos más usados debido a su facilidad de uso. Es un polímero permanente, claro y brillante como el poliestireno. Resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor similares al plástico de polietileno tereftalato, usado para las bebidas no alcohólicas y para otros productos no alimenticios. Es un material higroscópico que tiende a absorber humedad. Es estable a la luz U.V, dando como resultado figuras que no se decoloran. Su inflamabilidad es baja.(24)</p>	<p>-Biodegradable. -Proviene de recursos naturales renovables. -No desprende gases nocivos durante la fusión. -Confiere brillo a las piezas. -Material fácil de imprimir- recomendado para principiantes. -No necesita cama caliente. -No sufre fenómenos como warping o cracking (explicados posteriormente). -Buen comportamiento de las piezas en ángulos (20) (21) -Resistente a rayos U.V. -Higroscópico -Estabilidad dimensional alta</p>	<div>  <p>Fig. 20. Estructura del ácido Poliláctico. Fuente: Rafael A. Auras</p> </div> <p>Su forma molecular es (C₃H₄O₂)_n. Es un termoplástico rígido que puede ser semicristalino o totalmente amorfo (18). Se puede formular para ser rígido o flexible y puede ser copolimerizado con otros materiales. El PLA se puede hacer con diversas características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación seguido.”</p>	<p>Por ser biodegradable y reabsorbible el PLA encuentra múltiples aplicaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> Industrias alimentarias: Empaques para alimentos, envases, etc. Textil Cosméticos Medicina : Al poder ser asimilado por el organismo, ha encontrado múltiples aplicaciones en cirugía, ortopedia, ortodoncia, oftalmología, traumatología y otras ramas (36) Arquitectura: pabellones y viviendas temporales, maquetas.
<p>ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)</p>	<p>ABS es el nombre de la familia de termoplásticos. El acrónimo deriva de la suma de los procesos químicos necesarios para obtenerlo (el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno). (22).Es uno de los materiales más utilizados en las impresoras 3d de tecnología FFF. Es soluble en acetona. No es biodegradable, y sufre con la exposición a rayos UV. Tiene una temperatura de fusión superior a otros plásticos, acompañado de la necesidad del uso cama caliente entre 80°C y 100°C, por lo que el coste eléctrico de producción es mayor (14) (15) (16). El rasgo más importante del ABS es su gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a -40 °C). Además es duro y rígido, tiene una resistencia química aceptable, baja absorción de agua, buena estabilidad dimensional, alta resistencia a la abrasión y puede recubrirse con una capa metálica con facilidad (el ABS se puede, en una de sus variantes, cromar por electrólisis dándole distintos baños de metal a los cuales es receptivo). (23)</p>	<p>-No es biodegradable. Proviene de recursos no renovables. -Desprende gases nocivos para la salud en su fusión. Necesita buena ventilación del recinto. -Necesita cama caliente 80-100°C -Temperatura de fusión elevada -Sufre efectos como warping y cracking (Explicados posteriormente) -Le afectan las corrientes de aire durante la impresión. -Se altera con la exposición a rayos U.V - Buen post-procesado y trabajabilidad. -Baja absorción de agua - Estabilidad dimensional media-alta -Duro y rígido -alta resistencia a la abrasión -Tenacidad incluso a bajas temperaturas (-40° C) (22)(23)(24)</p>	<div>  <p>Fig. 22. Estructura del ABS. Fuente: Hanser Publishers.</p> </div> <p>El Acrilonitrilo proporciona rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura así como dureza.</p> <p>El butadieno proporciona tenacidad a cualquier temperatura. Interesante para ambientes fríos, en los cuales otros plásticos se vuelven quebradizos. El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez.</p> <p>Esta mezcla de propiedades, hace que el producto final contenga mejores propiedades que la suma de ellos. (23)</p>	<p>Automotrices:</p> <ul style="list-style-type: none"> partes cromadas, partes internas en las vestiduras e interiores partes externas pintadas en color carrocería. <p>-Juguetes:</p> <ul style="list-style-type: none"> bloques de LEGO, TENTE y airsoft, Piezas plásticas de casi todas las figuras de acción de BANDAI. (23) <p>-Piezas de aparatos electrónicos :</p> <ul style="list-style-type: none"> Carcasas de ordenadores, teléfonos. <p>-Electrodomésticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Recubrimiento interior – exterior

	Descripción/ características	Singularidades	Estructura	Aplicaciones
HIPS (Poliestireno de alto impacto)	Se trata de un material de poliestireno que usualmente se utiliza en combinación con el material ABS para la realización de piezas con espacios (huecos). (14) (15) Aunque la mayoría de sus propiedades mecánicas y físicas (rigidez, resistencia a tracción y a impacto, estabilidad térmica, etc.) son similares a las del ABS, hay una característica que lo hace diferente respecto a todos los demás que es su solubilidad en D-Limoneno, permitiendo realizar formas irrealizables con un material de soporte soluble, quedando la pieza sin ningún material de soporte y con una gran calidad superficial. Es un material indicado para realizar piezas técnicas ligeras y de alta calidad. Es un poco más ligero que el ABS, es por eso que se puede imprimir a una temperatura ligeramente inferior. (20) (21) (25)	-No es biodegradable. -Proviene de fuentes no renovables. -Resistente a aceites, grasas y álcalis pero no al combustible. -Buen post-procesado: Cromado, pintado, pegado y lijado. -Soporta mal los rayos U.V : Decoloran y se vuelve quebradizo. - Baja conductividad eléctrica, puede usarse como aislante. -Solubilidad en D-Limoneno. (20) (21) (25)(23) -Sufre warping y cracking aunque en menor medida que el ABS -Necesita cama caliente 80-100°C	El Poliestireno de Alto Impacto es una de las variedades existentes dentro de los poliestirenos. Dado que el poliestireno es un polímero muy frágil a temperatura ambiente, se modifica mediante la adición de polibutadieno, para mejorar su resistencia al impacto. Se designa comúnmente como HIPS (High Impact Polystyrene) o PSAI (Poliestireno de Alto Impacto). ➤ <u>Estructura química</u> : Para mejorar la resistencia al impacto del poliestireno se adiciona polibutadieno y acrilonitrilo a la mezcla; el polibutadieno es injertado en el poliestireno, formando un polímero con estructura de injerto. El acrilonitrilo y el butadieno son los compuestos que oponen resistencia a fuerzas mecánicas (23)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Componentes para automóviles. ○ Juguetes. ○ Maquinillas de afeitar desechables. ○ Teclados y periféricos para el PC. ○ Artículos para el hogar. ○ Teléfonos ○ Envases de productos lácteos (23)
PETG (Copoliéster de polietilentereftalato glicol)	Es un filamento muy fácil de imprimir, ya que tiene baja contracción. Está aceptado para su utilización con productos de uso alimentario (FDA). No emite olores y tiene una gran resistencia química. (15) Actúa como barrera para los gases, como el CO2, humedad y el O2. Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes. Liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido. Impermeable. Resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza. No es biodegradable	-No es biodegradable . -Proviene de fuentes no renovables. -Termodilatación baja, por lo que no tiene efecto warping ni cracking. -No necesita cama caliente, aunque se recomienda su uso. -Tenacidad y resistencias similares al ABS -100 % reciclable -Apto para exteriores, soporta los rayos U.V -91 % de transparencia en estado natural. -Barrera de gases como CO2, el O2 -Barrera contra la humedad. Impermeable. (20)(21)	El PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol (pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres).(23) Polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con lo que se logra una mayor transparencia. La razón de su transparencia al enfriarse rápidamente consiste en que los cristales no alcanzan a desarrollarse completamente y su tamaño no interfiere con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible, de acuerdo con la teoría cuántica. (23)	El PETG destaca por ser un plástico aprobado para uso alimentario por la FDA. Por ello es la opción recomendada para la creación de envases u otros elementos que vayan a estar en contacto con alimentos para el consumo humano (21) (22)

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

OBJETIVOS

Dentro de la gran variedad de termoplásticos actuales en el mercado, existen varios procedimientos para la obtención de datos relacionados con el comportamiento mecánico, pero estos datos siempre están referidos a comportamiento mecánico a tracción. En la gran mayoría de situaciones, cuando desarrollamos un objeto, además de tracciones, está sometido a compresiones, esfuerzo que hasta el momento no podemos controlar por la inexistencia de estudios al respecto.

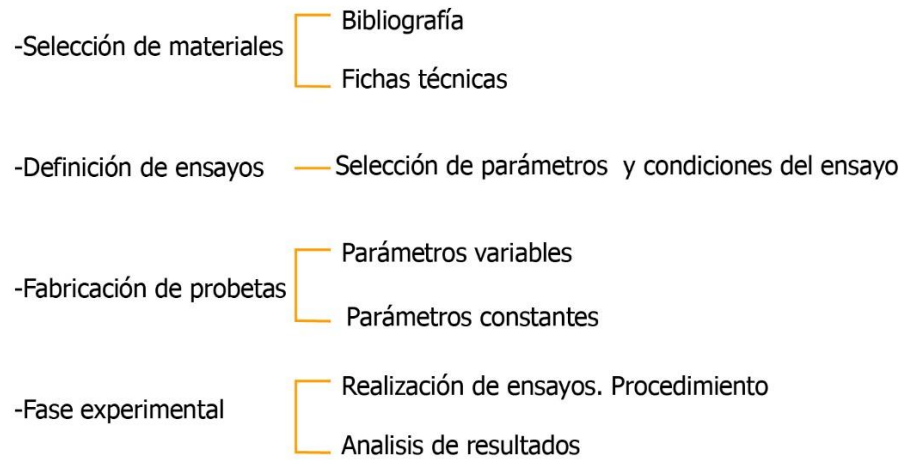
El objetivo general de este trabajo es determinar la resistencia mecánica a compresión de plásticos empleados en impresión 3d. Este dato es claramente deficiente en cualquier ficha técnica, ya que no existe ninguna normativa que regule este tipo de ensayos. Es un dato necesario para poder diseñar adecuadamente para el uso que queremos que esté destinado nuestro objeto. En este documento, mediante una metodología de trabajo, se demostrará las diferentes resistencias mecánicas a compresión de cada material seleccionado y cómo los parámetros usados afectan a dichas resistencias.

Para conseguir estos objetivos generales, es necesario cumplir unos objetivos específicos:

- Estudio de materiales
- Estudio de la normativa existe para obtener datos relevantes
- Estudio de los parámetros influyentes en el proceso de impresión 3D. Determinación de tipología y cantidad. Serán relevantes a la hora de realizar las comparaciones y estimar su influencia en el resultado final
- Definición del ensayo resistente.

METODOLOGÍA

El trabajo se articula en las siguientes fases y procesos:



✓ **SELECCIÓN DE MATERIALES:**

Dentro de la amplia variedad de materiales que existe para esta tecnología, entre los que se encuentran filamentos de madera, policarbonato, nylon, polipropileno, fibra de carbono, etc., se ha realizado una selección de los que se emplean de manera habitual. En este trabajo se estudiarán, pues, 2 tipos de PLA, uno ABS, uno de HIPS y uno de PETG.

✓ 1 PLA Blanco marca Bq(26). (Fig20)



Fig. 20. PLA. Fuente: www.bq.com

- ✓ 1 PLA marrón, ABS, HIPS y PETG marca A3dp. (Fig21)



Fig. 21. Materiales A3DP. Fuente: Imagen del autor.

En la comparación y estudio de los materiales seleccionados, se obtiene cierta información relevante. En primer lugar, el único plástico biodegradable y que proviene de fuentes renovables es el Pla, este resultó de la búsqueda de soluciones al problema de producción de residuos sólidos no biodegradables como son los plásticos tradicionales. Se estudió la obtención de nuevos plásticos que no dependieran del petróleo y que se descompusieran sin tóxicos cuando son desechados ,y esto, es de gran importancia.

También diferenciamos claramente dos grupos para los ensayos, aquellos que provienen de fuentes renovables y los que no. Esta separación esta argumentada también por las temperaturas, ya que los plásticos que provienen de fuentes no renovables su temperatura de fusión es superior, además de requerir base de impresión calefactada. El ABS y HIPS se han considerado como los más resistentes dentro de nuestra selección y sus aplicaciones frente al resto de materiales lo demuestran. El PETG a priori, no debería aportar datos significativos en cuanto a resistencias, ya que su uso es alimentario.

fichas técnicas:

Con respecto a los datos más relevantes aportados en las fichas técnicas de los productos seleccionados para los ensayos, se observa como las características y métodos de testeo para sus propiedades en general, ya sean mecánicas o térmicas entre otras, son similares a las aplicadas con el resto de fabricantes del mercado. Por tanto, se estudia la ficha que aporte una documentación adicional, en este caso del material blanco seleccionado de la empresa bq (26). (Fig. 22)

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Fig. 22. Propiedades Pla. Fuente: www.bq.com

Esta ficha técnica tiene una peculiaridad, ya que además de las propiedades descritas, se han realizado ensayos a tracción tanto de probetas inyectadas como probetas impresas con este material para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la figura 23 se recogen los resultados. Esto es de cierta relevancia ya que vemos que existe un interés en el conocimiento de las propiedades mecánicas por parte de los fabricantes.

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas ^a	Probetas impresas ^b	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO 527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO 527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

^a Estirado en dirección paralela a las capas.

^b Estirado en dirección perpendicular a las capas

Probetas	Altura de capa (mm)	Grosor pared exterior (mm)	Grosor parte inferior/superior (mm)	Densidad del relleno (%)	Diseño de impresión
Probeta impresa en dirección paralela a las capas	0,2	2	0,2	100	
Probeta impresa en dirección perpendicular a las capas	0,3	1	0,3	100	

Fig. 23. Propiedades mecánicas, Probetas. Fuente: www.bq.com

✓ DEFINICIÓN DE ENSAYOS:

Después del análisis de las correspondientes fichas técnicas, podemos encontrar una clara deficiencia respecto a su resistencia mecánica. En la mayoría de las fichas técnicas de productos de impresión 3d los datos más relevantes son resistencia a flexión, resistencia al desgarro y, en alguna ficha técnica puntual, se pueden encontrar datos correspondientes a propiedades mecánicas con probetas ya impresas. Para poder desarrollar una pieza correctamente se necesita conocer el uso que se le va a dar al objeto una vez impreso y las propiedades mecánicas que debe tener para así poder diseñarlo adecuadamente. En ninguna de las fichas técnicas consultadas, ya sean de los materiales seleccionados como aquellos que no, se ha desarrollado un estudio con probetas para conocer su resistencia mecánica a compresión.

Selección de parámetros y condiciones de ensayo:

Para poder conocer cuáles son los procedimientos aplicados en ensayos con probetas impresas y conocer sus propiedades mecánicas, estudiamos los realizados para conocer la resistencia a tracción. (27) (18)

Para el estudio se utiliza la normativa ISO 527-2 :2012 (28) , que en su parte 2 explica las condiciones de ensayo a plásticos para moldeo y extrusión. El tipo de probeta idónea para la realización del ensayo depende de las características de la impresora a utilizar y sus limitaciones. Todas aquellas probetas que pertenezcan a la misma tipología, deben de ser impresas en una misma tanda para evitar errores. El número máximo de probetas por tanda es 6. Las longitudes de la probeta quedan establecidas por la norma con un espesor de 2 mm. Una vez se define las longitudes de la probeta (Fig. 24) ,se modela en un programa tipo CAD para que posteriormente el laminador, divida en capas nuestra figura (Fig. 7).

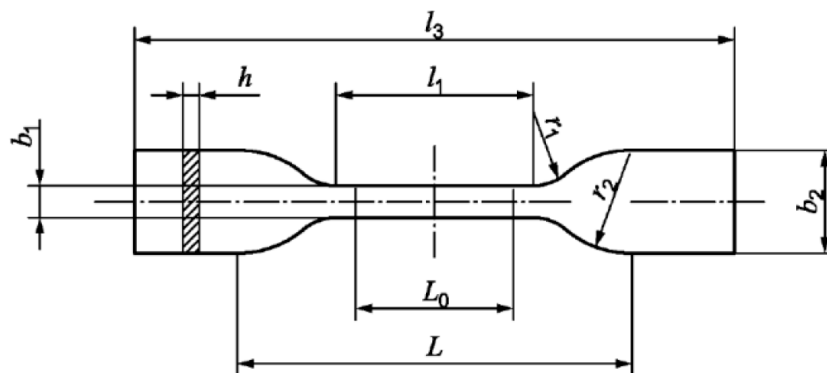


Fig. 24. Probeta tipo 5A. Fuente: Norma ISO 527-2

Una vez en el laminador, el siguiente paso es definir los parámetros a usar en los ensayos. Una vez definidos, se procede a imprimir para los posteriores ensayos a tracción. La norma establece la cantidad de 5 probetas por ensayo para obtener unos resultados óptimos en cuanto a la variabilidad que puede introducir el proceso. (28)

En cuanto al proceso de tracción es habitual mostrar los datos en Kilonewtons (KN) y en milímetros (mm). Existen unos límites de rango de fuerza correspondientes a 1KN y una deformación de 200mm.(18) Respecto a la velocidad de ensayo para la medición del módulo de elasticidad en tracción, depende del tipo de probeta. Para probetas tipo 1 A y 1B (Fig. 25), la velocidad de ensayo debe de ser 1mm/ min. Esto corresponde a un índice de deformación de aproximadamente 1% min.

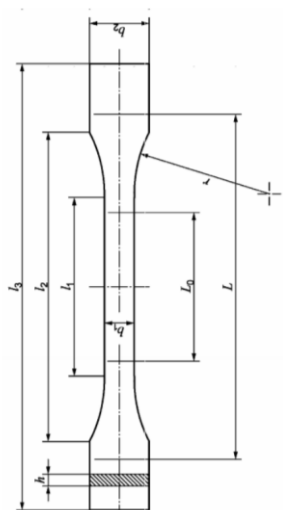


Tabla 1 – Medidas de las probetas tipo 1A y 1B

Medidas en milímetros

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.

Fig. 25. Probetas tipo 1A y 1B . Fuente: Norma ISO 527-2

Una vez aplicado el esfuerzo de tracción , es interesante conocer mediante toma de datos , la forma de rotura de cada una de las probetas con el fin de conocer el proceso de tracción (18)

Se estudia la deformación a rotura para las diferentes configuraciones de todos los plásticos ensayados.

-Aunque el objetivo de este tipo de ensayos sea fundamentalmente para la obtención de resultados a tracción, se obtiene la siguiente información que podemos aplicar para nuestros ensayos a compresión:

Velocidad de ensayo	1 mm/min
Cantidad de probetas mínimas por cada combinación de parámetros	5 probetas
Cantidad de probetas por tanda de impresión	Máximas posibles siempre que no superen 6, para evitar errores

✓ FABRICACIÓN DE PROBETAS:

La impresión 3d se caracteriza por usar una gran cantidad de parámetros para la obtención de un modelo físico. Cada parámetro afecta directamente al resultado del mismo y la conjunción de todos ellos, lo determina. Como vemos en la *Figura 26*, tomando el laminador Cura desarrollado por la empresa Ultimaker como ejemplo, los parámetros se dividen en grupos principales y subgrupos. Por ejemplo dentro del grupo calidad de impresión existen subgrupos como la altura de capa, altura de capa inicial, ancho de línea y ancho superior/inferior. Los grupos principales normalmente se organizan entre calidad de impresión, perímetro, relleno de la pieza, ajustes del material, refrigeración, soporte y adherencia a la placa de impresión.

Esta distribución es similar en los distintos laminadores del mercado.

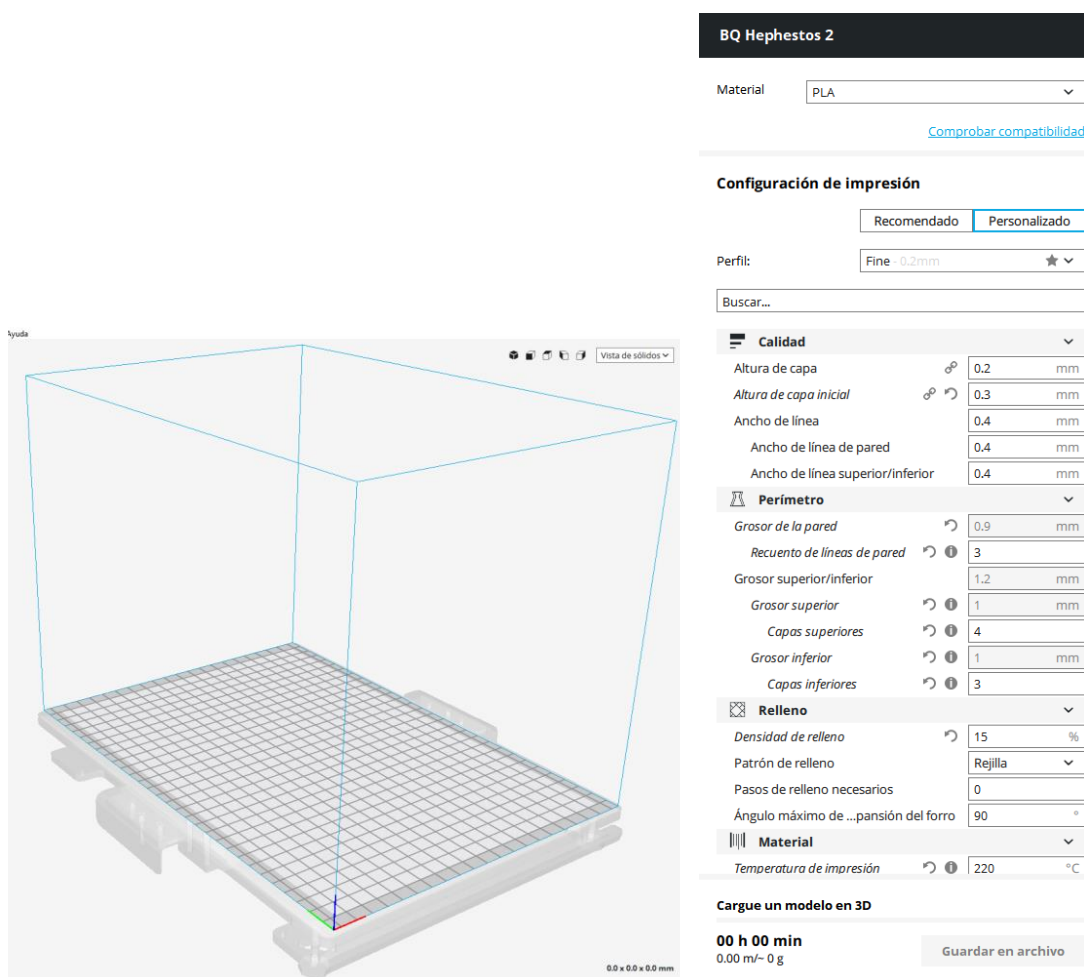


Fig. 26. Laminador Cura. Fuente: Elaboración propia

Para el estudio, debido al número de horas necesarias para obtener un resultado fiable, hemos tenido que reducir el número de parámetros a 2, ya que dentro de cada parámetro, tomaremos 3 variables diferentes.

Para situarnos, por cada parámetro que seleccionamos, si consideramos 3 variables para cada uno y 5 probetas por cada combinación se tienen que imprimir 15 probetas por material/parámetro. Si se consideran 2 parámetros habrá que imprimir 30 probetas por material, y así progresivamente.

Como el objetivo fundamental es argumentar y comparar las diferentes resistencias a compresión que ofrecen los plásticos con distinta composición ya mencionados, al multiplicar este valor de 2 parámetros por 5 materiales a estudiar, el número de probetas asciende a 150. Creemos que este es un valor que aporta una carga de trabajo coherente con el proyecto de trabajo fin de grado.

Por tanto se estudiarán 2 parámetros con 3 variables cada uno, dejando el resto de parámetros constantes.

1. Parámetros Variables

Los dos parámetros variables seleccionados son la **calidad de impresión** y **temperatura de impresión**:

- **Calidad de impresión:** este parámetro nos proporciona los valores de la altura de capa en milímetros. Los valores más altos producen impresiones más rápidas pero con una menor resolución. Los valores más bajos producen impresiones lentas pero con una resolución mayor. Este parámetro es fundamental ya que afecta directamente tanto a la resolución de las piezas como al tiempo consumido para poder obtenerlas (29). A mayor resolución, mayor tiempo, por ende, mayor consumo de energía. Si nuestra impresora dispone una boquilla del nozzle de 0.4 mm, los valores usados y recomendados son: **tabla 31**

Valores mínimos: No hay límite inferior para la altura de capa incluso con boquillas anchas, pero a alturas inferiores a 0.05-0.1 mm (50-100 micras) aparecen algunos factores que desaconsejan su elección como son:

- Excesivo tiempo de impresión
- Deformación de las capas por estar la boquilla caliente siempre muy cerca de la capa inferior

- Falta de resolución del extrusor (el motor tendría que girar a una velocidad demasiado lenta de manera uniforme y no será capaz)

Valores máximos: La altura de capa debe ser **menor al 80%** del diámetro de la **boquilla del nozzle**, con lo que la elección de esta boquilla nos limita las opciones.

Ejemplo: Boquilla de 0,4 mm de diámetro <-> No superar 0,32 mm de altura de capa.

Un diámetro de boquilla más pequeña en conjunción con una altura de capa más baja, se considera una buena solución para obtener una superficie lisa y con un nivel de detalle mucho mayor. (30)

Por tanto para las pruebas, usaremos 0.1-0.2-0.3 mm (100-200-300 micras) con una boquilla de 0.4mm

Para mostrar claramente las diferencias entre las distintas calidades, se puede observar la *Figura 27* (31).



Fig. 27. Fuente: Josef Prusa (prusa3d)

Valores mínimos	Valores medios	Valores máximos
50-100 (micras)	100-200 (micras)	200-300 (micras)

Tabla. 31. Valores usados y recomendados. Boquilla 0.4mm . Calidad de impresión. Fuente: Elaboración propia

- **Temperatura de impresión:** este parámetro muestra el valor en grados centígrados a la que el fusor va a calentar el filamento. En la *Figura 28* (32) se muestran los diferentes componentes del extrusor para entender la aplicación de

temperatura al filamento. El extrusor es la parte de la impresora 3D que va cogiendo y empujando el filamento para luego fundirlo. Para ello, encontramos un componente fundamental, denominado fusor o Hot-end. El fusor se divide en distintas zonas: zona fría, caliente y de transición (obsérvese *Figura 29* (33)). La zona fría se encarga de mantener el equilibrio e impide que el calor llegue al motor de empuje. En esta zona el filamento se deposita en estado sólido. La zona caliente, donde el material termina el proceso de cambio de estado y se funde por completo, siendo aquí, donde el mismo se adapta al diámetro de la boquilla. En esta zona nos encontramos 2 elementos de vital importancia como son: el cartucho calefactor (se encarga de proporcionar la energía necesaria para alcanzar y mantener la temperatura) y el termistor (sensor de temperatura que nos ayuda a monitorizar la misma).

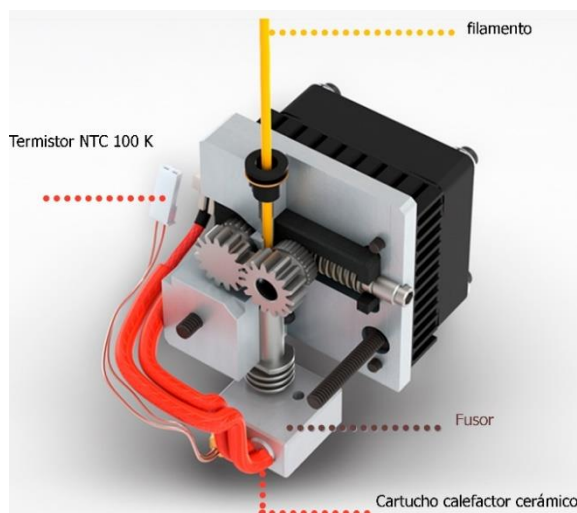


Fig. 28. Fuente: www.bq.com

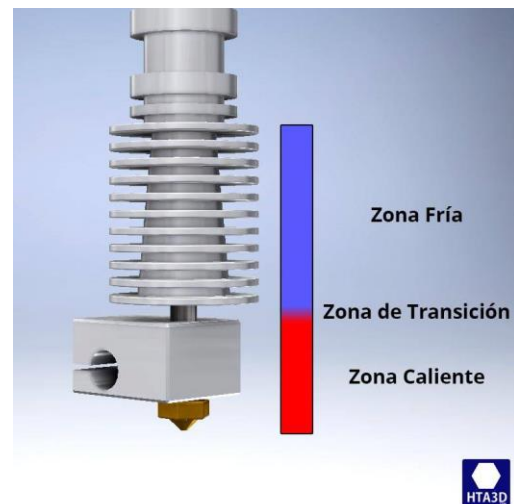


Fig. 29. Fuente: www.hta3d.com

La temperatura es interesante de analizar ya que, a diferencia del anterior parámetro, no afecta al tiempo de impresión. Este valor también afecta económicamente porque a mayor temperatura de fusión, implica un mayor consumo de energía. Por tanto, es atractivo saber si con una temperatura menor, podemos conseguir un resultado suficiente o es necesario, por el contrario, aplicar más temperatura.

La temperatura óptima de impresión depende de cada material y está determinada por su composición. La idea principal era intentar buscar unos valores de temperatura que fueran aceptados por todos los filamentos, para ello, partimos de los valores óptimos del

PLA, ya que es el material más habitual de impresión. Estos valores son 200-210-220°C, donde **210°C** es la temperatura óptima. En estos tres rangos, los dos tipos de PLA probados, se comportan perfectamente como puede observarse en las *Figuras 30 y 31*. Cuando nos referimos a un buen comportamiento estamos centrandonos en características tales como capacidad de fluir por el extrusor sin producir atascos, material sin warping ni cracking (Se explicara posteriormente con el ABS y HIPS) y sin necesidad de utilizacion de base de impresión calefactada ni cerrada.

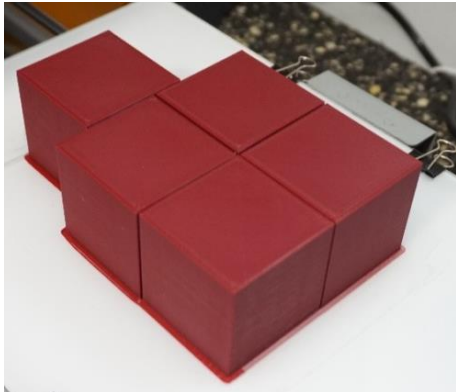


Fig. 30. PLA marrón. Fuente: Imagen del autor

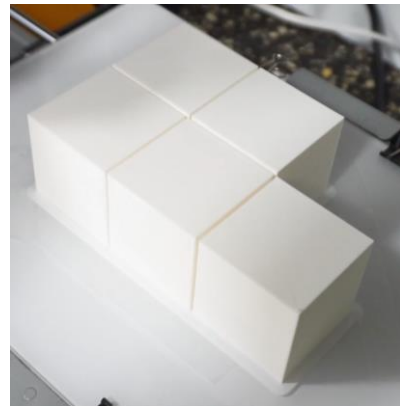


Fig. 31. PLA blanco Fuente: Imagen del autor

Al cambiar de filamento vemos que, si imprimimos con los mismos parámetros de temperaturas usados en el PLA, encontramos serias dificultades. (*Fig. 32*)

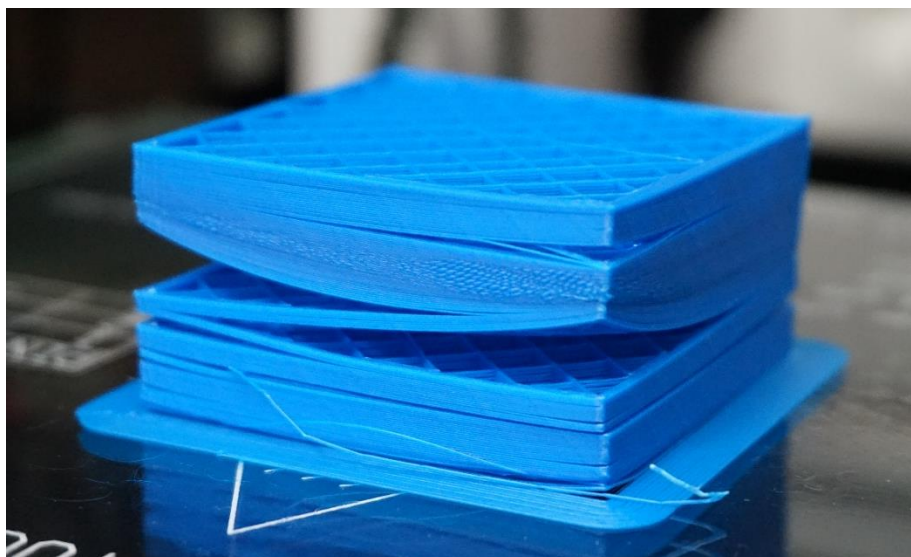


Fig. 32. Fuente: Imagen del autor (material HIPS a 210 °C.)

Argumento de cambio de temperatura- búsqueda de temperatura óptima

Al empezar a imprimir con HIPS, al igual que el ABS, se detectó que la temperatura era un factor importante, ya que, al igual que el PLA, cada material tiene un rango de temperaturas de fusión óptimas, por tanto, el primer punto sería buscar los rangos de temperaturas óptimas para cada material. Si se imprime fuera del rango de las temperaturas óptimas, como es el caso de la primera prueba realizada *Figura 33-34* aparecen de una manera muy pronunciada los fenómenos denominados Warping y cracking. Estos fenómenos tienden a reducirse cuando rondamos los valores óptimos.

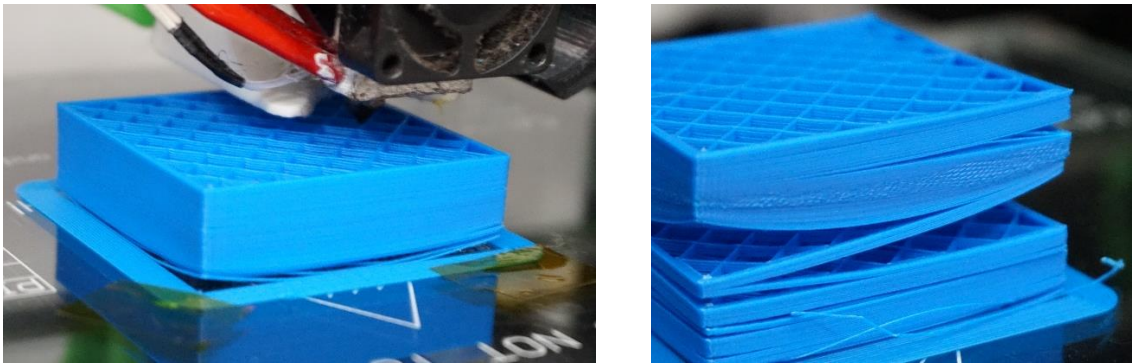


Fig.33-34. HIPS impreso a 210°C. Fuente: Imagen del autor

Fenómenos problemáticos:

Warping (8)

La tecnología FFF, al estar depositando una capa sobre una base de impresión y esta capa es el soporte de las siguientes capas, a medida que diferentes partes de la impresión se enfrían, se generan unas tensiones internas que hace que cada capa de la impresión se distorsione ligeramente, lo que provoca deformaciones o contracciones. Cuando tenemos piezas de gran tamaño, corren un riesgo especial de deformación debido a las grandes variaciones de temperatura. La solución, en la gran mayoría de casos, consiste en crear una balsa de impresión o un borde, para así tener una mayor superficie de contacto e impedir que las capas se despeguen. Por tanto, una buena adhesión de la primera capa y tener una cama calefactada ; juegan un papel importante ya que limita la probabilidad de deformación o distorsión (*Fig. 35*).

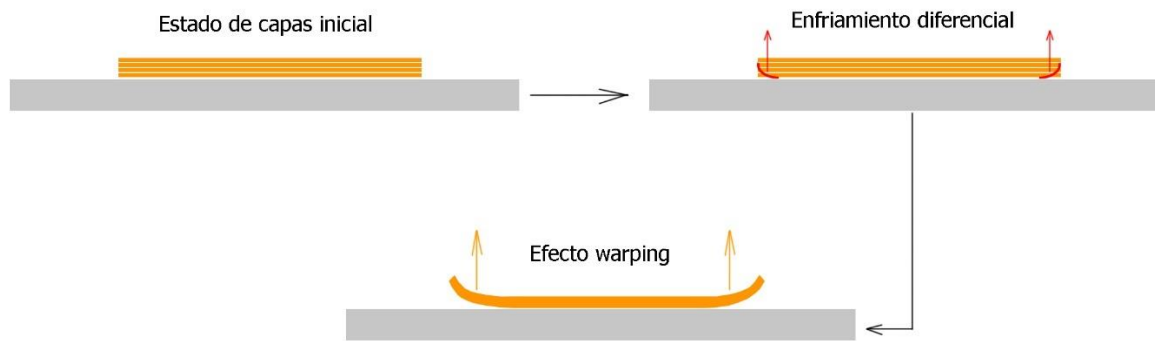


Fig. 35. Efecto Warping. Fuente: Elaboración propia.

Cracking (8)

Al igual que el warping , este efecto es producido debido a la alta contracción térmica y las tensiones internas del material debido al enfriamiento. Cuando imprimimos a una temperatura inferior a su rango de temperaturas adecuadas, si depositamos filamento en una capa, y transcurre un cierto periodo de tiempo hasta que se deposita de nuevo la siguiente capa , es posible que la capa inferior se haya enfriado , por lo tanto existe una diferencia de temperaturas importantes y esto produce tensiones internas entre las capas, que se traduce en una separación de las mismas (Fig. 36). Cuando imprimimos con HIPS o ABS, al tener las mismas cualidades, es recomendable que la impresora este alejada de corrientes de aire, ya que esto impedirá que se produzca este fenómeno con mayor medida, ya que las capas inferiores se enfriaran más rápido. Esto es algo que se ha podido comprobar, ya que cuando la impresora estaba expuesta a corrientes de aire, el resultado nunca era favorable.

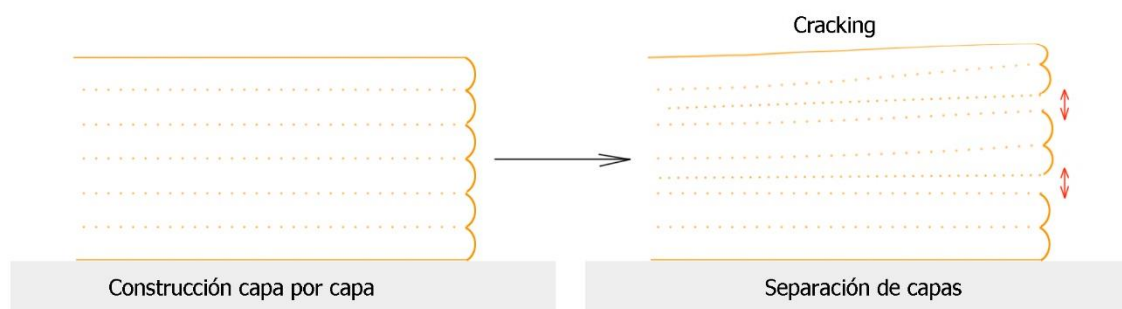


Fig. 36. Efecto Cracking. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta estos dos efectos principales, se buscan los rangos de temperaturas óptimos aplicados al HIPS y al ABS. El rango de temperaturas del **HIPS** se encuentra entre 220-230-240 °C siendo los **230 ° C** su temperatura óptima. En el caso del **ABS** , los rangos de temperaturas van desde 220-230-240 °C mientras que su temperatura

óptima se encuentra en **240 °C**. En ambos casos, a diferencia de las impresiones con PLA, es imprescindible usar cama caliente para evitar el efecto warping ya mencionado. La **cama caliente** estará precalentada a **80°C**.

Respecto al **PETG**, al tener una termodilatación baja, permite la impresión de grandes volúmenes sin efecto warping ni cracking, aunque es recomendable el uso de cama caliente. La temperatura óptima la encontramos a **230 °C** con un rango de temperatura de 220-230-240 ° C. La **cama caliente** también estará precalentada a **80°C**. (Fig. 37)

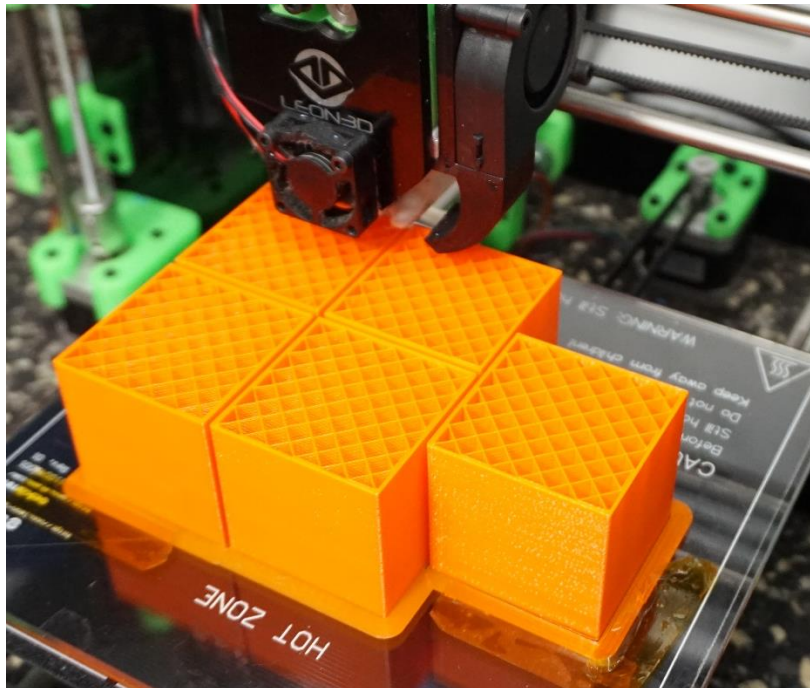


Fig. 37. Impresión con PETG. Fuente: Imagen del autor

2. Parámetros constantes

- **Densidad y patrón de relleno:**

Los objetos creados con impresión 3d no tienen por qué ser macizos. Para ahorrar material y disminuir el tiempo de producción con el respectivo coste que supone, las piezas se imprimen con una estructura interna conocida como relleno. El relleno es un factor que permite que las piezas se impriman más rápido y de manera más rentable. Este relleno regulable es ajustado con un patrón de relleno. Por tanto dentro del relleno de la pieza existen dos factores fundamentales, la densidad de relleno y el patrón de relleno. La densidad puede ser ajustada entre un valor del 0-100%(0% significa que la

pieza está totalmente hueca y 100% totalmente maciza). En la figura 38 podemos observar la relacion entre distintos porcentajes de relleno desde el (10-20-40)% mientras que el patron de relleno nos muestra diferentes configuraciones internas que podemos seleccionar.

En los distintos laminadores del mercado, podemos ver como por defecto, el valor de la densidad de relleno se situa en un 20% ya que es adecuado para la mayoria de impresiones 3d. Es importante saber la aplicación de nuestro objeto impreso para así,seleccionar la densidad de relleno optima. Para las pruebas se usará una **densidad de relleno del 10%**,ya que se encuentra dentro de los valores minimos recomendados, ahorrando significativamente tiempo y costes de producción.

En algunos laminadores es posible ir variando la densidad de relleno de la pieza, aportando mas o menos densidad en aquellas zonas que lo necesiten. En nuestro caso la densidad será uniforme en todo su recorrido. (8)

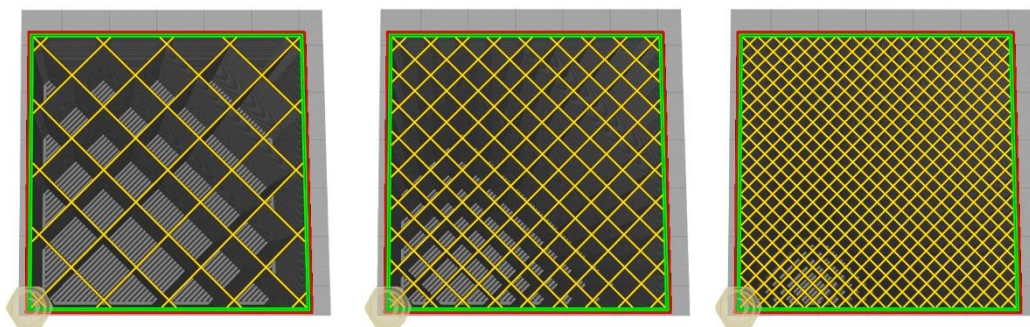


Fig 38. Densidades de relleno. Fuente: Elaboración propia

En la configuracion de relleno de la pieza, existe un parametro denominado patrón de relleno. Se usara una configuracion tipo rejilla o tambien denominado relleno rectangular. En la *Figura 39* se puede observar los distintos tipos de patrones mas usados en impresión 3d.

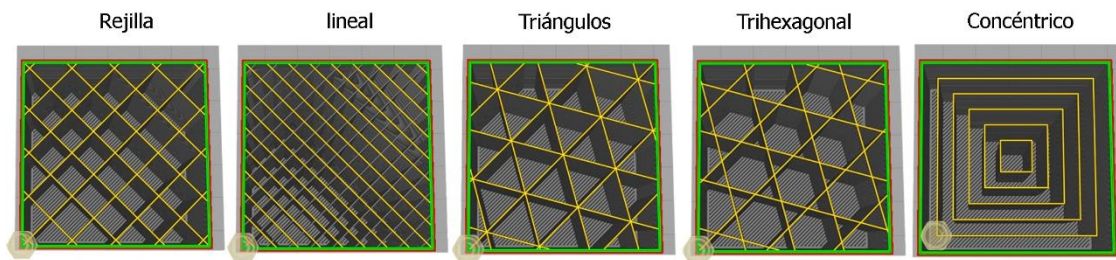


Fig. 39. Patrones de relleno. Fuente: Elaboración Propia.

Como vemos existe una gran variedad de patrones para el relleno de piezas, se ha querido seleccionar un patrón que nos asegure una union perfecta entre el interior de la pieza y su perimetro. Dentro de esta categoria el patron estandar para la mayoria de impresiones es el de rejilla ya que otorga resistencia en todas las direcciones y es relativamente mas rápido de imprimir que otros patrones.

- **Velocidad de impresión:**

La velocidad de impresión afecta directamente al tiempo de impresión de la figura. La velocidad de impresión tiene un impacto fundamental respecto al resultado. Cuanto mas rapido es este valor, significa que el extrusor tiene que aplicar una mayor fuerza. Cada vez que el extrusor cambia de dirección, se produce inercia, que puede causar pequeñas vibraciones que afecten al resultado creando ciertas imperfecciones. Cuando imprimimos a velocidades mas bajas , esta inercia se reduce consiguiendo un mejor resultado.

La velocidad tambien aumenta la presión en el extrusor, y esto puede producir sobre extrusion de plástico en algunos momentos ya que , cuando el extrusor se detiene o reduce la velocidad , la presion hace que el filamento siga saliendo por la boquilla del extrusor. (34) (35). Generalmente se suele imprimir a 50 mm/ s para conseguir un buen equilibrio entre tiempo de impresión y calidad. Por tanto, las probetas estarán impresas a **50 mm/s**. En la *figura 40*, observamos los valores tomados para la realización de las probetas. Para mejorar el resultado normalmente las capas exteriores del perimetro se suelen imprimir a una velocidad inferior (25mm/s) que las capas de relleno interior (50mm/s)

Velocidad de impresión

Velocidad a la que se realiza la impresión.

Afecta a

- Velocidad de relleno
- Velocidad de pared
- Velocidad superior/inferior
- Velocidad de soporte
- Velocidad de la torre auxiliar
- Velocidad de desplazamiento
- Velocidad de capa inicial
- Velocidad de desplazamiento de la capa inicial
- Velocidad de impresión de la balsa

Velocidad
▼

Velocidad de impresión	↺	50	mm/s
Velocidad de relleno		50	mm/s
Velocidad de pared		25.0	mm/s
Velocidad de pared exterior		25.0	mm/s
Velocidad de pared interior		50.0	mm/s
Velocidad superior/inferior		25.0	mm/s
Velocidad de soporte	⚙️	50	mm/s
Velocidad de desplazamiento		120	mm/s

Cargue un modelo en 3D

00 h 00 min

0.00 m/~ 0 g

Guardar en unidad extraíble

Fig. 40. Velocidades de impresión. Laminador Cura. Fuente: Elaboración propia

La definición del resto de los parámetros mas secundarios; se muestra en la figura 41.

BQ Hephestos 2

Material PLA

[Comprobar compatibilidad](#)

Configuración de impresión

Recomendado
Personalizado

Perfil: Fine - 0.2mm ★ ▼

Buscar...

Calidad

Altura de capa ↺ 0.2 mm

Altura de capa inicial ↺ 0.3 mm

Perímetro

Grosor de la pared ↺ 0.9 mm

Recuento de líneas de pared ↺ 3

Grosor superior/inferior 1.2 mm

Grosor superior ↺ 1 mm

Capas superiores 5

Grosor inferior ↺ 1 mm

Capas inferiores 5

Relleno

Densidad de relleno ↺ 10 %

Patrón de relleno Rejilla

Pasos de relleno necesarios 0

Material

Temperatura de impresión ↺ 220 °C

Diámetro 1.75 mm

Flujo 100 %

Habilitar la retracción ☒

Velocidad

Listo para Guardar en archivo

13h 59min

57.55 m/~ 172 g

Guardar en archivo

BQ Hephestos 2

Material PLA

[Comprobar compatibilidad](#)

Configuración de impresión

Recomendado
Personalizado

Perfil: Fine - 0.2mm ★ ▼

Buscar...

Flujo

Flujo 100 %

Habilitar la retracción ☒

Velocidad

Velocidad de impresión ↺ 50 mm/s

Velocidad de relleno 50 mm/s

Velocidad de pared 25.0 mm/s

Velocidad de pared exterior 25.0 mm/s

Velocidad de pared interior 50.0 mm/s

Velocidad superior/inferior 25.0 mm/s

Velocidad de soporte ⚙️ 50 mm/s

Velocidad de desplazamiento ↺ 60 mm/s

Refrigeración

Soporte

Generar soporte ↺ ☐

Colocación del soporte ↺ En todos sitios

Ángulo de voladizo del soporte ↺ 80 °

Patrón del soporte ↺ Zigzag

Conectar zigzags del soporte ↺ ☒

Densidad del soporte ↺ 18 %

Distancia de... del soporte ↺ 3 mm

Listo para Guardar en archivo

13h 59min

57.55 m/~ 172 g

Guardar en archivo

Fig. 44. Parámetros constantes usados. Fuente: Elaboración propia

Las probetas tendrán unas dimensiones de (5x5x5)cm. Esta medida ha sido tomada en relación con las medidas mínimas aceptadas por la prensa para la obtención de resultados con validez. A la hora de obtener datos de calibración de la impresora, tiene mayor exactitud cuanto mayores son las dimensiones del cubo de calibración, por lo que estas medidas anteriormente citadas, nos parecen adecuadas para evitar posibles errores. Después de cada impresión , las muestras se almacenan en bolsas de cierre hermético, con bolsas de Silica gel para impedir que puedan almacenar humedad antes del ensayo. (Fig. 45)



Fig. 45. Almacenaje de probetas. Fuente: Imagen del autor

A continuación se muestran los tiempos promedios de fabricación de cada probeta en función de su calidad de impresión (la temperatura no afecta al tiempo) :

100 micras	200 micras	300 micras
261 minutos	150 minutos	112 minutos

Identificación de combinaciones:

Como se ha comentado anteriormente se estudiarán 2 parámetros con 3 variables cada uno , dejando el resto de los parámetros anteriormente descritos como constantes. Cada probeta tendrá un control alfanumérico marcado con rotulador permanente, para así ,

poder identificar de forma inmediata la combinación de parámetros usados en dicha probeta. Este control se realizara con cada probeta de cada material. En las combinaciones podemos observar claramente cómo los valores que podemos comparar entre si son: los dos tipos de PLA por un lado, y el resto de materiales (ABS , HIPS y PETG) por otro. Existe estos dos grupos ya que cada grupo, debido a propiedades de rangos de temperatura de fusión de cada material, requiere una combinación diferente. Solo podemos comparar entre si aquellas combinaciones cuyos parámetros empleados sean idénticos. De esta forma, las muestras se estudiarán en dos grupos. Grupo 1 y grupo 2.

Material	Denominación	Calidad (Micras)	Temperatura °C
PLA blanco	PLA_B_C1_(1-5)	300	210
	PLA_B_C2_(1-5)	200	210
	PLA_B_C3_(1-5)	100	210
	PLA_B_C4_(1-5)	200	200
	PLA_B_C5_(1-5)	200	220
PLA marrón	PLA_M_C1_(1-5)	300	210
	PLA_M_C2_(1-5)	200	210
	PLA_M_C3_(1-5)	100	210
	PLA_M_C4_(1-5)	200	200
	PLA_M_C5_(1-5)	200	220
HIPS	HIPS _C1_(1-5)	300	230
	HIPS _C2_(1-5)	200	230
	HIPS _C3_(1-5)	100	230
	HIPS _C4_(1-5)	200	220
	HIPS _C5_(1-5)	200	240
ABS	ABS _C1_(1-5)	300	230
	ABS _C2_(1-5)	200	230
	ABS _C3_(1-5)	100	230
	ABS _C4_(1-5)	200	240
	ABS _C5_(1-5)	200	250
PETG	PETG _C1_(1-5)	300	230
	PETG _C2_(1-5)	200	230
	PETG _C3_(1-5)	100	230

PETG	PETG _C4_(1-5)	200	220
	PETG _C5_(1-5)	200	240



Fig. 46. Identificación de combinaciones. PLA Blanco. Fuente: Imagen del autor



Fig. 47. Identificación de combinaciones. PLA marrón y HIPS. Fuente: Imagen del autor



Fig. 48. Identificación de combinaciones. ABS y PETG. Fuente: Imagen del autor

✓ FASE EXPERIMENTA.PROCEDIMIENTO:

Mediciones antes y después del esfuerzo:

Para comprobar las posibles deformaciones que se darán lugar en las piezas una vez realizado el ensayo , es necesario tomar medidas de cada una de las caras (B x L x H). En cada cara se tomará 3 medidas , una en cada extremo y otra central, siendo el valor obtenido la media aritmética de los 3 valores. (Fig 49)



Fig. 49. Toma de medidas. Fuente: Imagen del autor

Estas comprobaciones se realizaran antes y despues del ensayo, para asi conocer como es el comportamiento de las probetas frente a las tensiones y comprobar, si en funcion de cada parametro, existe una variabilidad en el resultado.

Pesado antes del esfuerzo: Es importante conocer la diferencia de peso entre materiales impresos con las mismas características. Para ello se usará una báscula digital. Esto será necesario para conocer la densidad aparente de cada material. (Fig 50).

Densidad aparente= Masa / Volumen



Fig. 50. Pesaje de probetas. Fuente: Imagen del autor

A Continuación se muestran los diferentes valores de densidad aparente por material, para ello se realizara una media aritmética del peso de las distintas probetas realizadas para cada material:

	Formula	Resultado gr/cm3
PLA blanco	=33.25 gr/ 125 cm3	0.266
PLA marrón	=33.124 gr/ 125 cm3	0.264
HIPS	=26.63 gr/ 125 cm3	0.213
ABS	=25.88 gr/ 125 cm3	0.207
PETG	=29.83 gr/125 cm3	0.238

TABLA. 10. Comparación de densidades. Fuente: Elaboración propia

Ensayos de resistencia a compresión :

Para la rotura de las probetas de (5x5x5) cm se utiliza una prensa multiensayo de 300 KN, marca Codein S.L. modelo MCO-30. La prensa se calibró a una velocidad de ensayo de 1 mm/min. La prensa tiene unos dispositivos adaptables que capacitan la rotura de dichas probetas. El control de dicha carga se aplica por ordenador. La superficie de pisón es de 40 x 40 mm (160 mm²) y la base consta de dos rodillos metálicos situados paralelamente con una distancia entre ellos de 100 mm. La probeta siempre se colocara con la cara (B), que es la marcada con la combinación hacia el frente. Esto hará que todas las probetas tengan las mismas condiciones, ya que la impresora, al ser de 3 ejes de coordenadas, puede haber algún dato erróneo si lo colocamos en sentidos diferentes. La carga siempre se realiza perpendicular al sentido de las capas (Fig.51). Una vez se realice la carga, se procede a realizar una limpieza de los datos, después de haber introducido en Excel el archivo .DTS arrojado por la prensa.

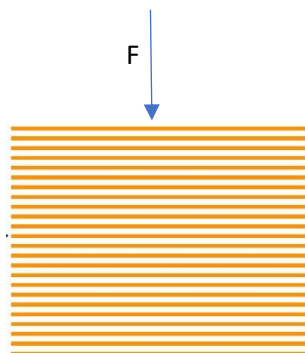


Fig. 51. Aplicación de la carga. Prensa. Fuente: Elaboración propia

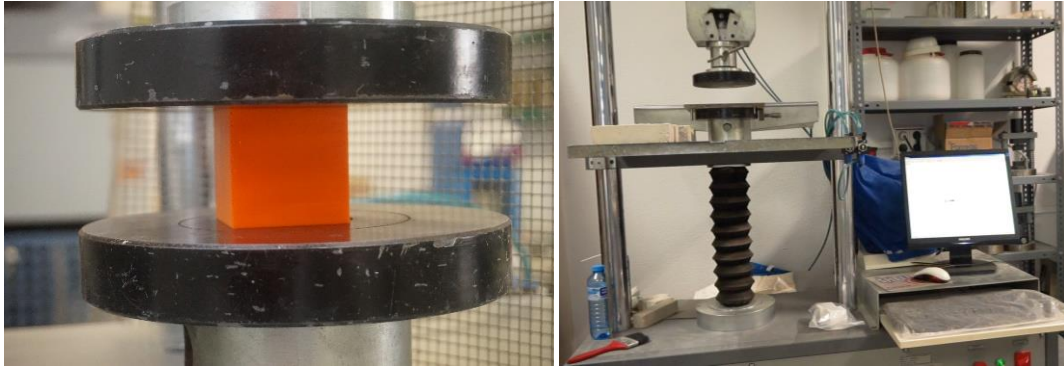


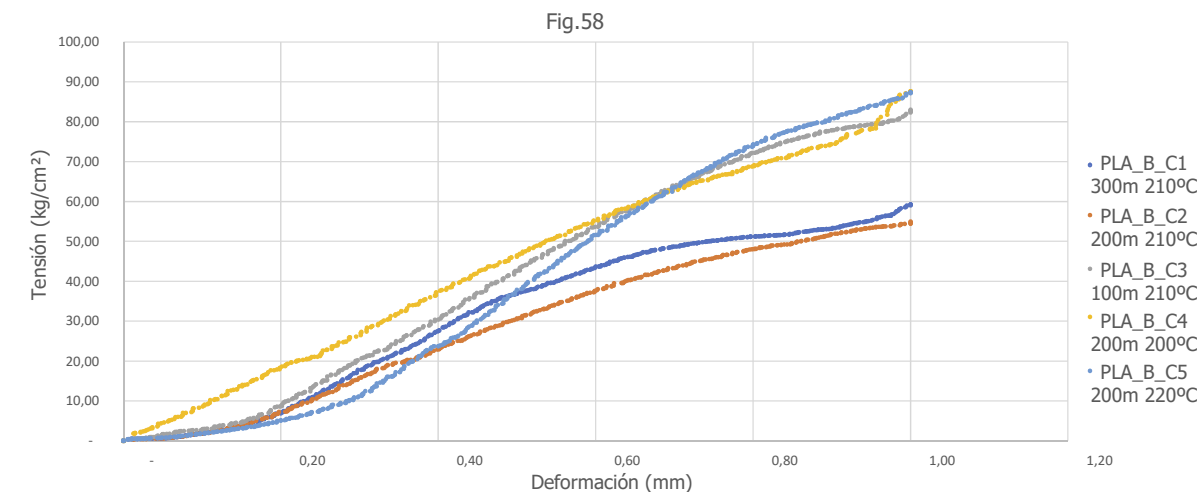
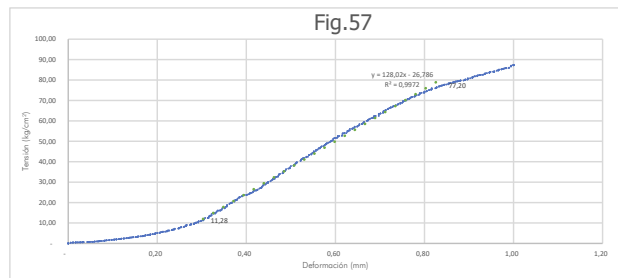
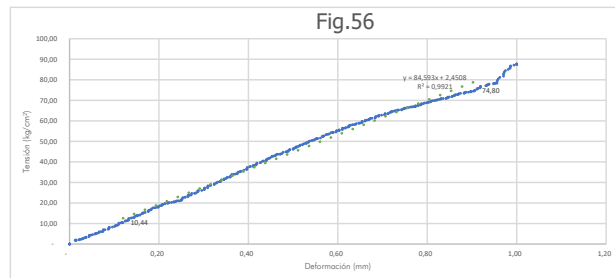
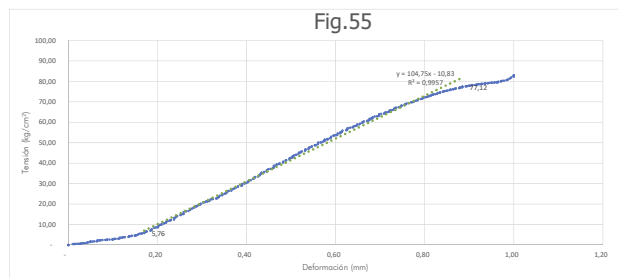
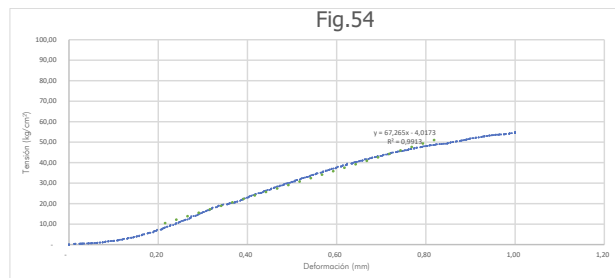
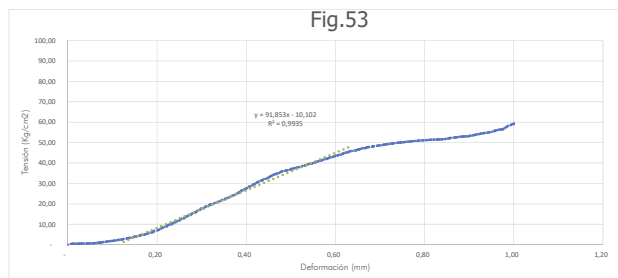
Fig. 52. Muestra de ensayo. PETG. Fuente: Imagen del autor

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados, se realizará en dos fases. En una primera fase se estudiará cada material individualmente con sus combinaciones descritas anteriormente y una segunda fase en la que se compararán los distintos materiales entre sí con aquellas combinaciones que sean iguales. Dentro de cada comparativa, se estudiarán dos puntos por separado correspondiente a los parámetros principales objeto de las gráficas como son; temperatura de fusión y calidad de impresión.

Para analizar estos datos, se realizan unas tablas que representan dentro de cada material y combinación de parámetros, cuales han sido aquellas circunstancias que han hecho que un material alcance su punto de rotura. Cuando se encuentra estos casos, se mostrará y analizará el tipo de rotura y deformación.

Comentar que cada gráfica mostrada por combinación de parámetros es el resultado de 5 gráficas. Estas 5 gráficas corresponderían a cada una de las probetas ensayadas por cada combinación.



PROBETA	DIMENSIONES DESPUÉS (MM)
PLA blanco _C3_1 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA , 49´5
PLA blanco _C3_2 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA , 49´8
PLA BQ _C3_3 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA , 49´0
PLA blanco _C3_5 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA , 49´7
PLA blanco _C4_4 200 MICRAS 200 °C	ROTURA, ROTURA , 49´6
PLA blanco _C4_5 200 MICRAS 200 °C	ROTURA, ROTURA , 49´7
PLA blanco _C5_1 200 MICRAS 220 °C	ROTURA,ROTURA,49´7
PLA blanco _C5_3 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA,49´8
PLA blanco _C5_4 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA,49´8



Fig.59

- Calidad de impresión:
Respecto a calidad, la combinación que obtiene un mejor resultado es 100μ, aunque es la que mayor tiempo de producción necesita. No tiene tanta proporcionalidad respecto calidad-resistencia ya que a 300 micras se observa como tiene un valor superior a 200 μ, siendo peor calidad.
- Temperatura de impresión:
Respecto a temperaturas la mayor resistencia se obtiene a 220 °C aunque a 200 °C se obtiene un comportamiento más lineal.
Por tanto en relación tiempo-resistencia, la mejor combinación es 220 °C 200 μ, obteniendo un valor de 87,77 kg /cm². Si queremos el mayor valor de resistencia posible tendremos que combinar 220 °C– 100 μ.
Tenemos que tener presente el comportamiento a rotura de este material, para así saber cuáles son los valores máximos por combinación que podemos aplicar. Estos datos son interesantes ya que teniendo en cuenta la posible integración en la arquitectura efímera, si se aplicara, no podríamos llegar a los valores máximos ya que podríamos provocar daños a las personas cercanas.
Para analizar estos datos, se realizan unas tablas que representan dentro de cada material y combinación de parámetros, cuales han sido aquellas circunstancias que han hecho que un material alcance su punto de rotura. Cuando se encuentra estos casos, se mostrara y analizara el tipo de rotura y deformación.

En este PLA en cuestion, se observa que la situacion con menos probabilidad de producir rotura se encuentran con las combinaciones C1 y C2, relacionado con la temperatura óptima y calidades media-baja. En cuanto subimos de calidad, o variamos la temperatura de la óptima (210°C), el material tiene una mayor tendencia de rotura. Esta rotura siempre se produce en el punto de maximo esfuerzo. Cuando llega a este punto, se escucha un sonido rotundo y se desprenden las capas del perimetro de las capas de relleno Figura 90, con una fuerza de desprendimiento importante. La combinación con mayor probabilidad de rotura, en un 75% es aquella en la que su calidad es maxima , correspondiendo con el valor maximo de carga.

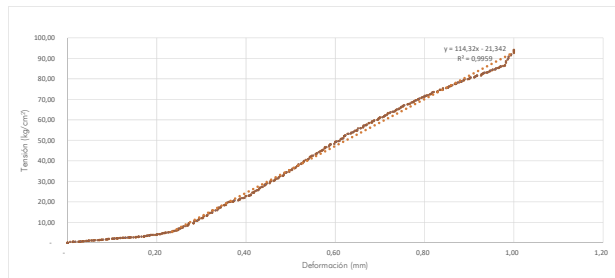
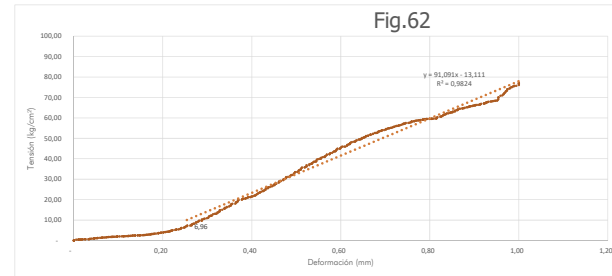
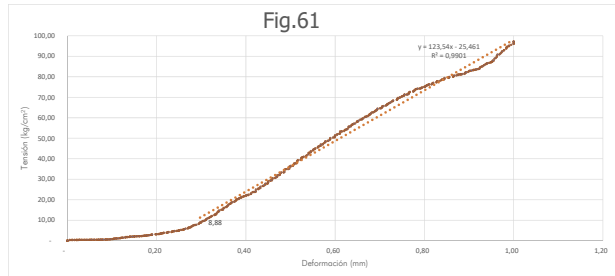
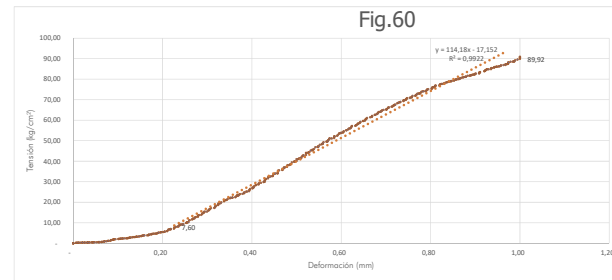
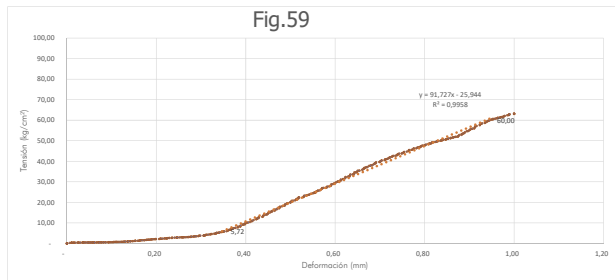
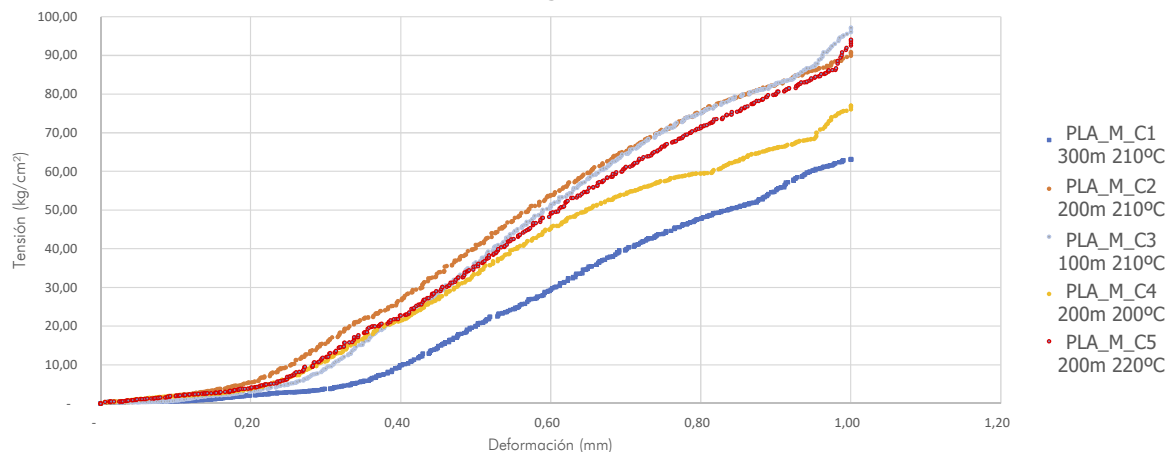


Fig. 59. Tensión/Deformación PLA_M_C1
Fig. 60. Tensión/Deformación PLA_M_C2
Fig. 61. Tensión/Deformación PLA_M_C3
Fig. 62. Tensión/Deformación PLA_M_C4
Fig. 63. Tensión/Deformación PLA_M_C5
Fig. 64. Tensión/Deformación PLA_M_Comparativa
Fig. 65. Rotura probetas PLA_M
Fuente: Elaboración propia

Fig.64



PROBETA	DIMENSIONES DESPUES (MM)
PLA marrón _C2_1 200 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA,50 ´1
PLA marrón _C2_2 200 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA,49 ´8
PLA marrón _C2_3 200 MICRAS 210 °C	ROTURA,ROTURA , 49 ´7
PLA marrón _C3_3 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA,48 ´8
PLA marrón _C3_5 100 MICRAS 210 °C	ROTURA, ROTURA, 49 ´8
PLA marrón _C4_1 200 MICRAS 200 °C	ROTURA,ROTURA,49 ´5
PLA marrón _C4_3 200 MICRAS 200 °C	50 ´0 ,ROTURA,49 ´4
PLA marrón _C5_1 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA ,50 ´2
PLA marrón _C5_2 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA ,49 ´8
PLA marrón _C5_3 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA ,49 ´9
PLA marrón _C5_4 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA ,49 ´9
PLA marrón _C5_5 200 MICRAS 220 °C	ROTURA, ROTURA ,50 ´3

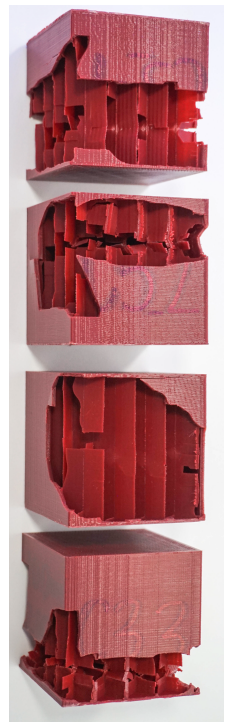


Fig.65

- Calidad de impresión:
Respecto a la calidad, cuanto más elevado sea el espesor de capa, menor es la resistencia a compresión, por tanto la resistencia aumenta desde las 300 – 200 – 100 μ . Existe un cambio representativo entre las (100-200 μ) y las 300 μ . El comportamiento y resultados de 100 y 200 μ son similares mientras que las 300 μ muestra un cambio representativo conforme a disminución de resistencia

- Temperatura de impresión:
Respecto a la temperatura de impresión, los valores obtenidos son muy similares aunque de nuevo, la máxima resistencia se obtiene con la temperatura más elevada. De todas estas pruebas, la combinación con más resistencia es 100 μ -210 °C con un valor total de 97.20 kg/cm². Si queremos obtener más resistencia, la mejor de las combinaciones será por tanto 100 μ – 220 °C.

Al igual que lo explicado con el PLA_B, las probetas con mayor resistencia, cuando llegan a su punto máximo estallan, por lo que tendremos que tener precauciones y no utilizar estas combinaciones si nuestro propósito es llegar hasta tales valores de resistencia. Respecto a la deformación obtenida por las demás probetas realizadas sin rotura, las deformaciones en todas sus caras están en un rango de (0.1-1)mm de media

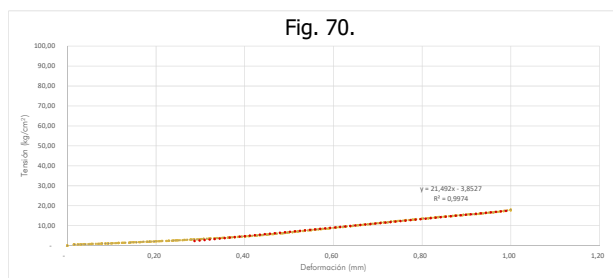
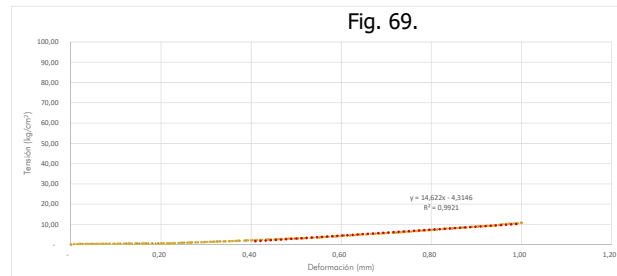
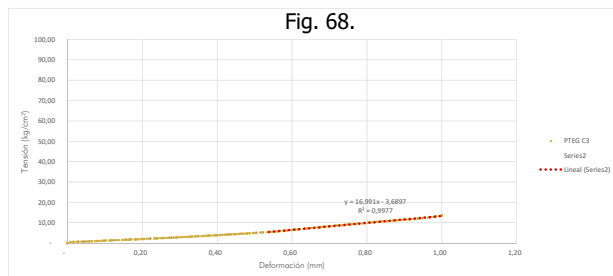
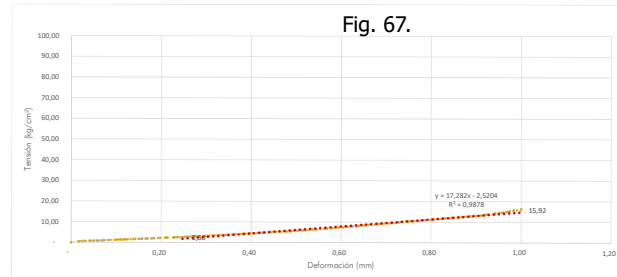
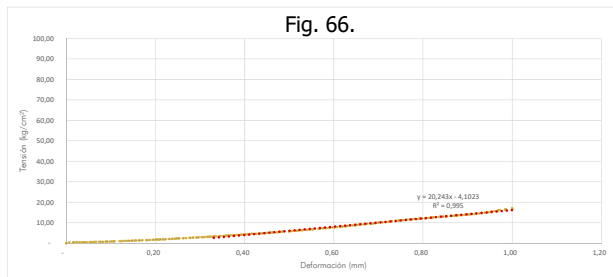
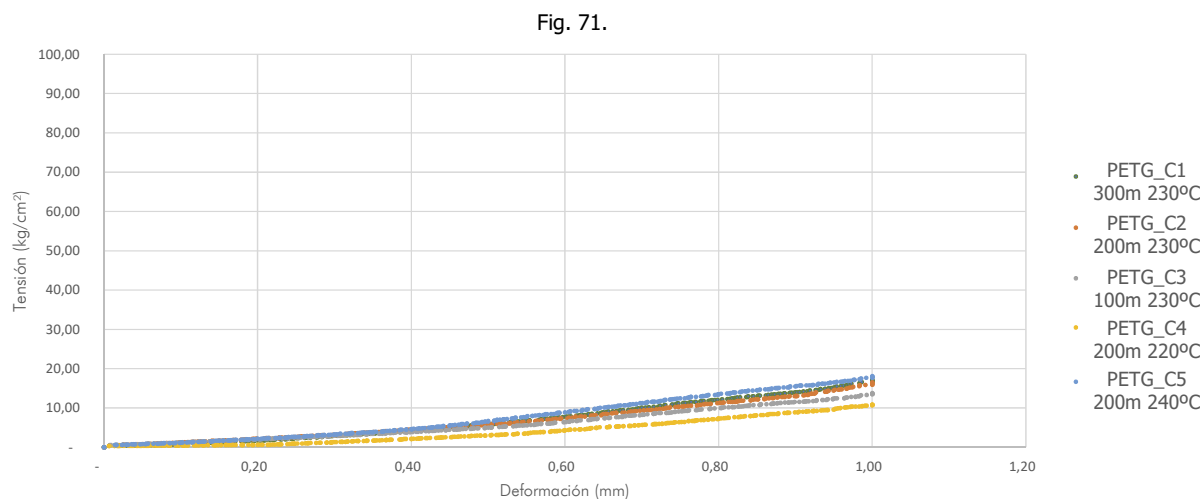


Fig. 66. Tensión/Deformación PETG_C1
 Fig. 67. Tensión/Deformación PETG_C2
 Fig. 68. Tensión/Deformación PETG_C3
 Fig. 69. Tensión/Deformación PETG_C4
 Fig. 70. Tensión/Deformación PETG_C5
 Fig. 71. Tensión/Deformación PETG_Comparativa
 Fig. 72. Rotura probetas PETG
 Fuente: Elaboración propia



PROBETA	DIMENSIONES DESPUES (MM)
PTEG_C5_1 200 MICRAS 240 °C	49´7,ROTURA,49´4
PTEG_C5_3 200 MICRAS 240 °C	49´5,ROTURA,49´5



Fig. 72.

- Calidad de impresión:
No es un factor predominante, los resultados están muy igualados.

- Temperatura de impresión:
El parametro principal a tener en cuenta a la hora de imprimir PETG es la temperatura de fusión, ya que cuando esta temperatura disminuye , lo hace también su resistencia. Cuando se imprime a 240 °C, la mayor temperatura ensayada ,se obtiene la mayor resistencia aunque la calidad de impresión no sea la mayor. Por tanto , a igualdad de calidad de impresión, con una diferencia de 20 grados podemos pasar de obtener el mayor y el menor valor de resistencia.

Se puede conseguir la mejor combinación a resistencia con 300 μ y 240 °C. Esto es favorable ya que a menor calidad de impresión, menor es la cantidad de horas que tenemos que emplear para producir el mismo objeto.

Los valores obtenidos con este material, nos hace remarcar su uso principal, envases de alimentos. Estos productos no destacan (tampoco se necesita) por tener valores de resistencia mecánica a compresión elevadas.

Ruido apreciable de capas que se separan unas de otras durante la carga, esta separación es claramente observable. No existe ninguna probeta que, llegado a su punto de máxima tensión , haya estallado, aunque en aquellas marcadas con rotura, significa que en algún punto, las capas de las paredes han llegado a separarse del relleno

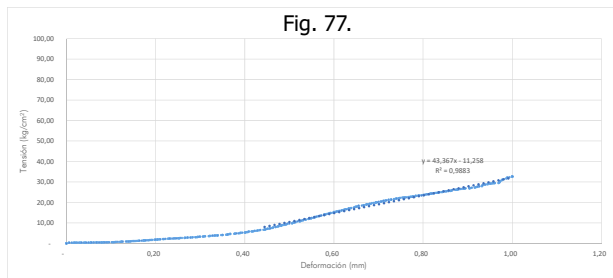
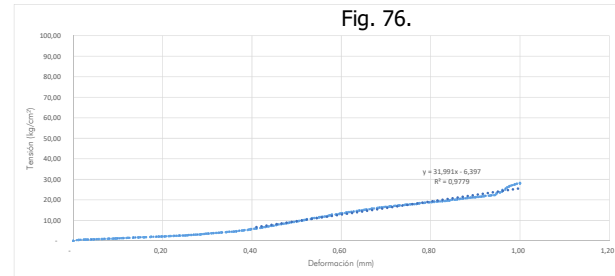
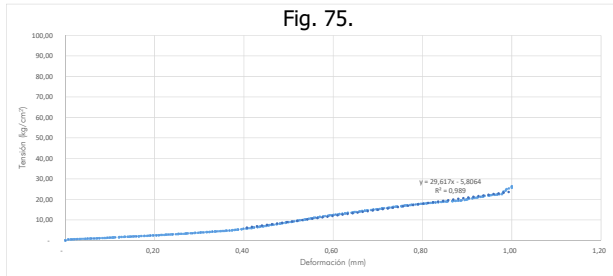
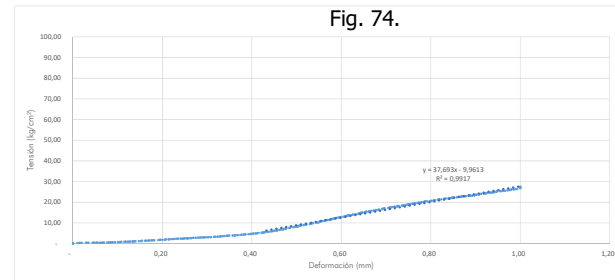
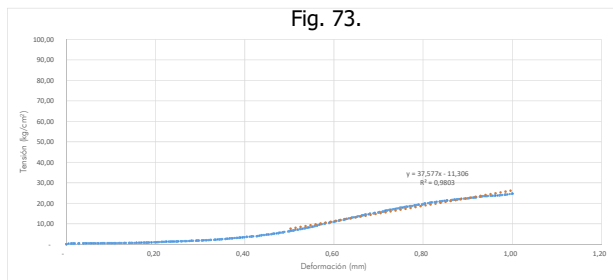
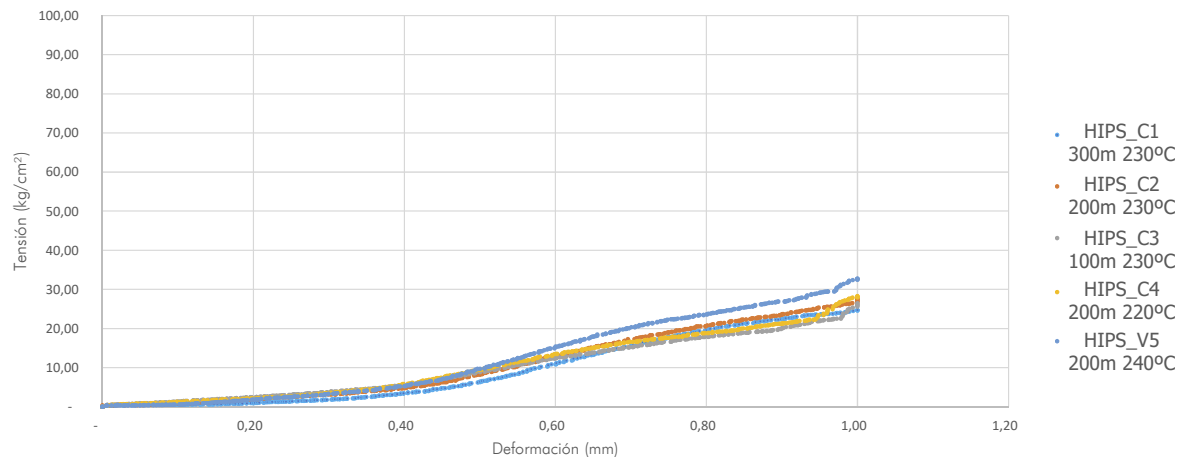


Fig. 73. Tensión/Deformación HIPS_C1
 Fig. 74. Tensión/Deformación HIPS_C2
 Fig. 75. Tensión/Deformación HIPS_C3
 Fig. 76. Tensión/Deformación HIPS_C4
 Fig. 77. Tensión/Deformación HIPS_C5
 Fig. 78. Tensión/Deformación HIPS_Comparativa
 Fig. 79. Rotura probetas HIPS
 Fuente: Elaboración propia

Fig. 78.



PROBETA	DIMENSIONES DESPUES (MM)
HIPS _C1_1 300 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,49 ´5
HIPS _C3_4 100 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,49 ´9
HIPS _C4_2 200 MICRAS 220 °C	ROTURA,50 ´7,50 ´0
HIPS _C5_5 200 MICRAS 240 °C	ROTURA,ROTURA,49 ´8



Fig. 79.

- Calidad de impresión:
 El poliestireno de alto impacto tiene un comportamiento similar en todos sus rangos de impresión de calidad

- Temperatura de impresión:
 Es el factor predominante. Cuanto mayor temperatura, mayor resistencia a compresión. Este material tiene una contracción térmica muy elevada y le afecta mucho los cambios de temperatura durante su impresión. Por tanto a mayor temperatura, mayor cohesión existe entre las capas de la pieza, por lo que la resistencia aumenta.

La mejor combinación se encuentra a 200 μ – 240 °C de temperatura de fusión y 80 °C de temperatura de base de impresión por lo que obtenemos un valor de 32.76 kg/cm²

No tiene roturas elevadas. Estas roturas suelen estar situadas en los ángulos de las uniones del perímetro. Las piezas a diferencia del PLA, cuando llegan a su punto de máxima tensión, no estallan.

Las deformaciones en las piezas sin rotura, se encuentran en valores entre 0.1-0.7mm

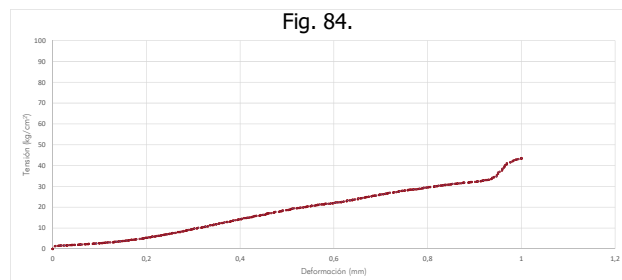
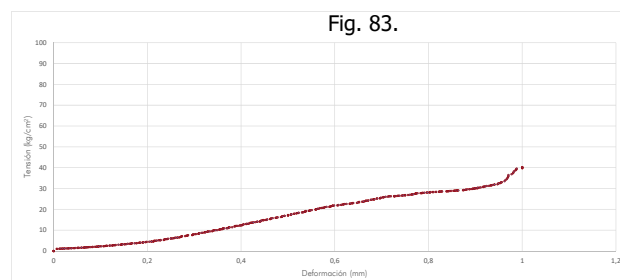
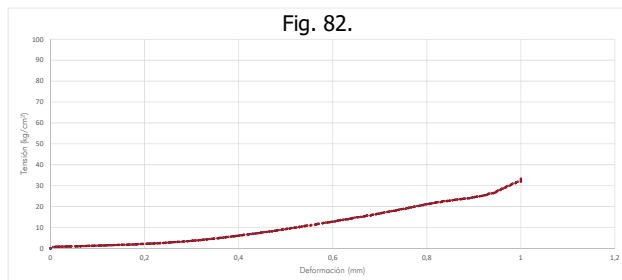
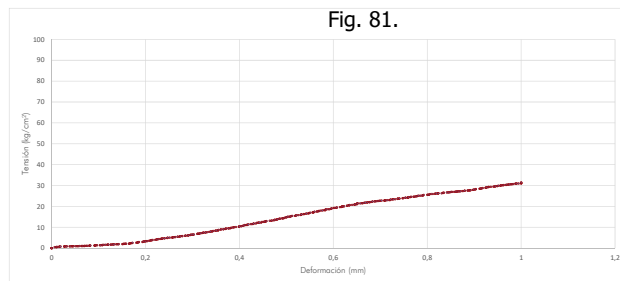
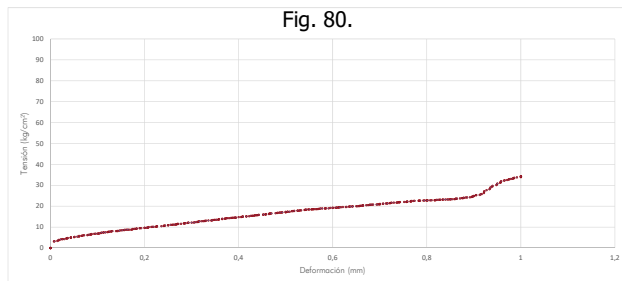
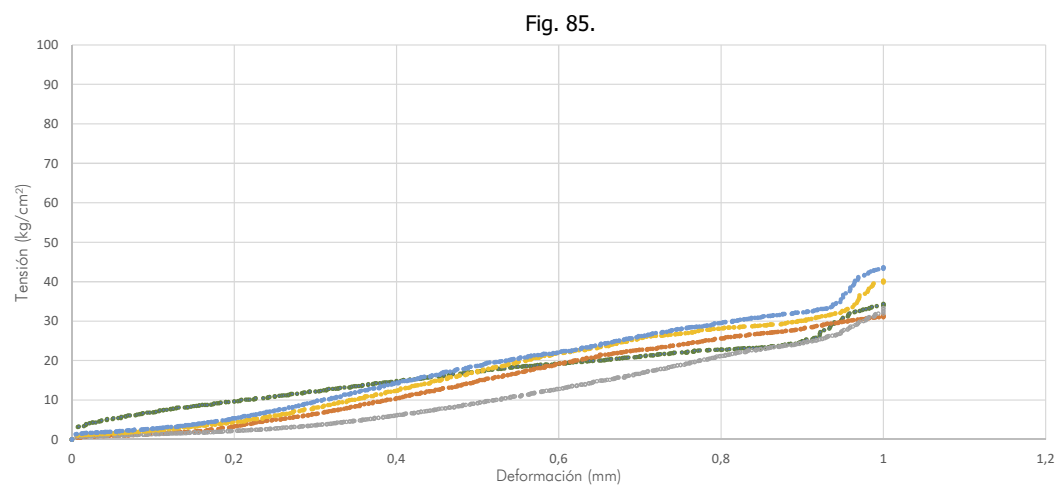


Fig. 80. Tensión/Deformación ABS_C1
 Fig. 81. Tensión/Deformación ABS_C2
 Fig. 82. Tensión/Deformación ABS_C3
 Fig. 83. Tensión/Deformación ABS_C4
 Fig. 84. Tensión/Deformación ABS_C5
 Fig. 85. Tensión/Deformación ABS_Comparativa
 Fig. 86. Rotura probetas ABS
 Fuente: Elaboración propia

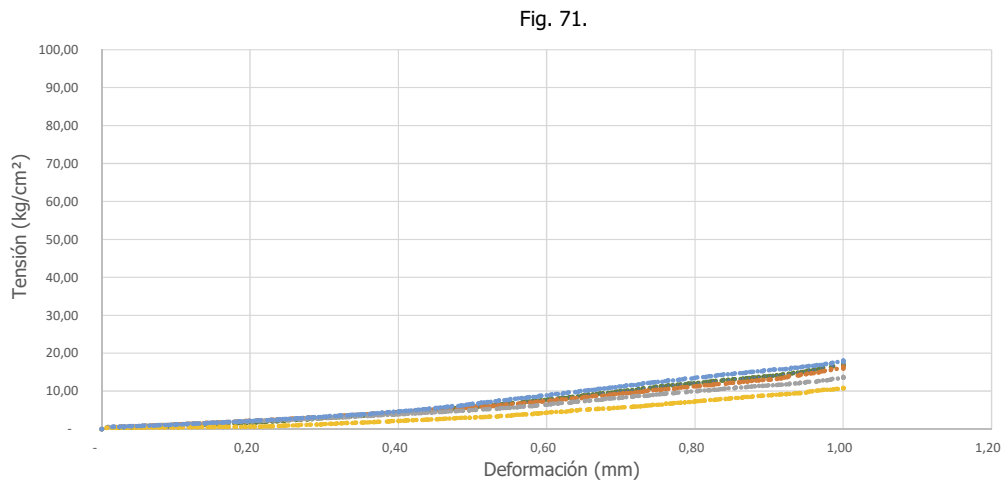
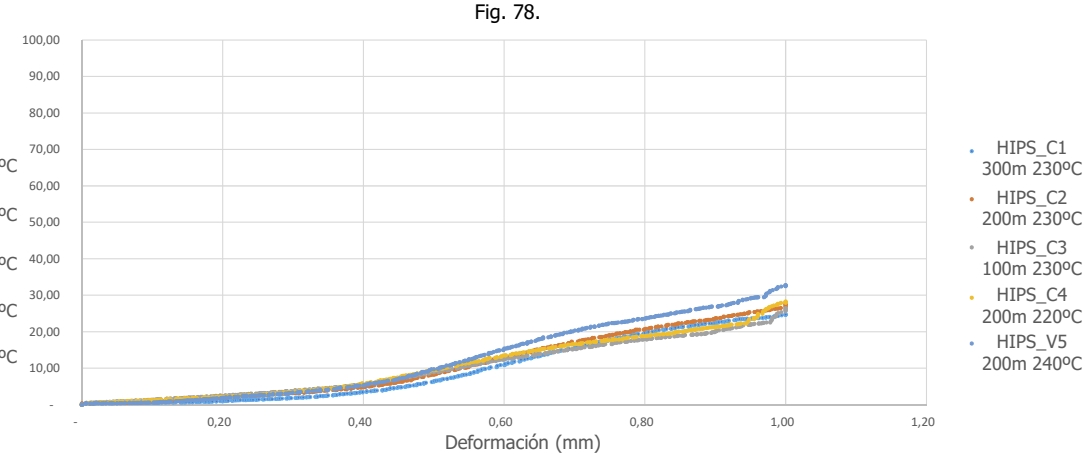
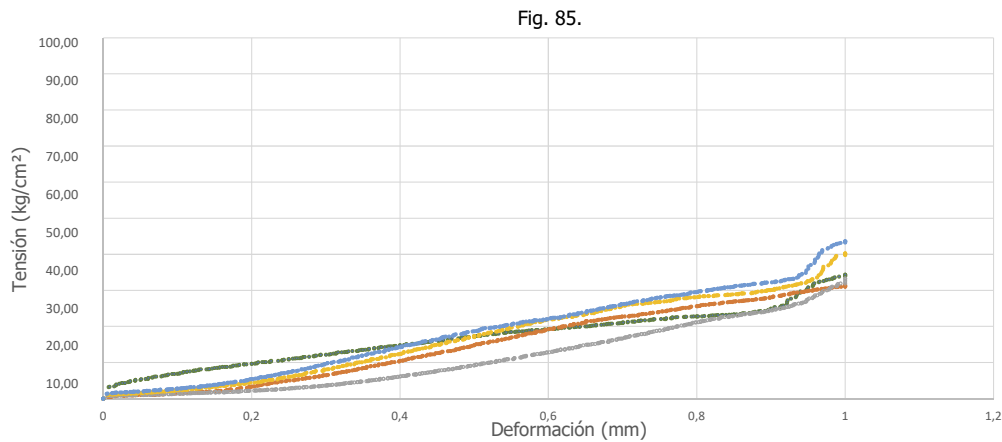
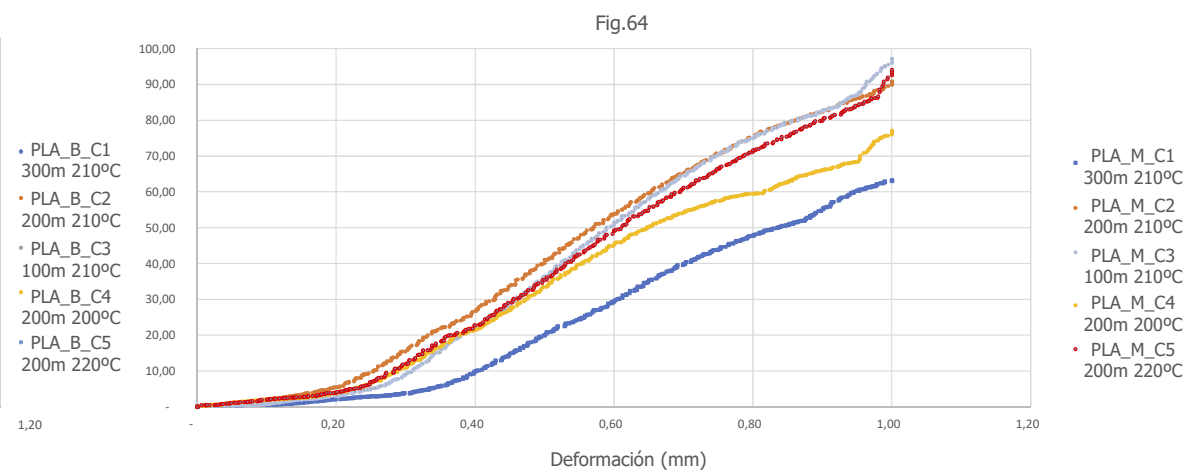
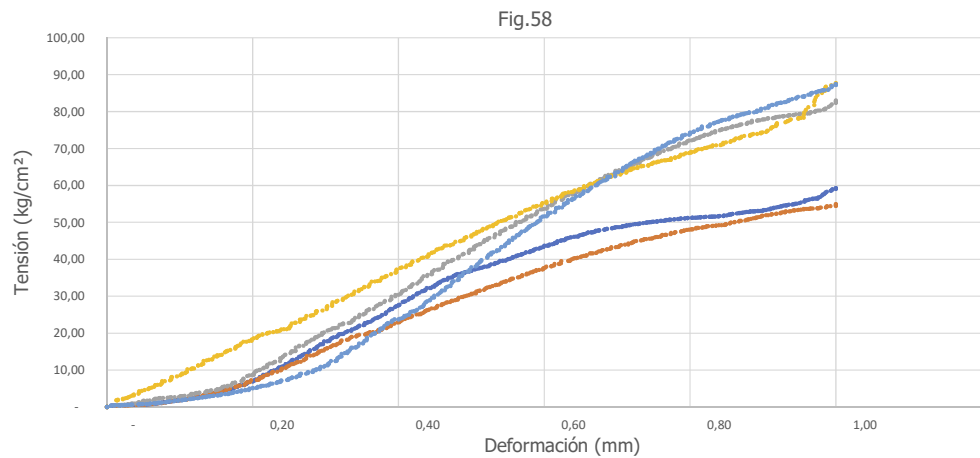


PROBETA	DIMENSIONES DESPUES (MM)
ABS _C2_1 200 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,49´1
ABS _C2_5 200 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,49´4
ABS _C3_2 100 MICRAS 230 °C	ROTURA,50´2,50´0
ABS _C3_3 100 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,50´1
ABS _C3_4 100 MICRAS 230 °C	ROTURA,ROTURA,50´1



Fig. 86.

- Calidad de impresión:
Respecto a la calidad aunque la curvatura de cada una de ellas sea diferente, con un comportamiento mas o menos lineal, el punto de rotura alcanzado es prácticamente el mismo en los 3 casos.
- Temperatura de impresión:
Respecto a la temperatura, si que vemos un cambio significativo, ya que cada aumento de temperatura, hace que el acabado de la pieza sea mejor. Se ha observado que a mayor temperatura, se reduce drásticamente los fenómenos conocidos como warping y cracking y esto influye muy significativamente en el valor resistente. La temperatura por tanto con mejor resultado es 250° C.
Cuando nos encontramos piezas con rotura, podemos ver que se despegan en ciertos puntos el perímetro del relleno pero que en ningún momento llega a estallar.
Emite un sonido intenso justo antes de llegar a su punto de máximo esfuerzo.
Las deformaciones de las piezas sin rotura van desde un rango de (0.1-0.8)mm



En estas comparativas tenemos dos grupos principales:

- El grupo 1 compuesto por 2 tipos diferentes de PLA que podemos comparar entre sí, ya que están impresos con las mismas combinaciones. Se observa como el valor máximo se obtiene con PLA_M. Este tiene un comportamiento mas lineal que el PLA_B.
- El grupo 2 compuesto por HIPS, ABS Y PETG. Se tiene que observar que las combinaciones sean idénticas para poder compararlos entre sí. Se observa como el HIPS y ABS tienen propiedades mecánicas a compresión y comportamientos similares. Estos dos materiales, en su proceso de impresión sufren ambos los mismos fenómenos de warping y cracking, aunque el HIPS lo sufra con menor medida. Su consecuencia se traduce en que el HIPS tiene un comportamiento similar en todas sus combinaciones mientras que el ABS, tiene mayores problemas respecto a la temperatura. Se observa que el material con menos resistencia mecánica a compresión es el PETG.

CONCLUSIONES

Después de haber realizado el estudio de cada material y la comparación entre ellos, podemos concluir que el material con mayor resistencia mecánica a compresión es sin duda el PLA y esto es una gran noticia por varias razones.

El uso de polímeros de la petroquímica introdujo grandes beneficios, pero cada vez es más evidente, que su empleo ocasiona daños al medio ambiente. Existe una preocupación debido a este impacto, ya que los desperdicios de estos plásticos son cada vez mayores, con baja degradabilidad. Hoy, el mayor porcentaje de residuos sólidos lo aportan los plásticos tradicionales, obtenidos con recursos no renovables, con la contaminación que eso supone en el proceso de extracción, transporte y refinación.

Como ejemplo, el Plan Nacional integrado de Residuos que se desarrolló para el año 2008-2015 ya preveía la disminución de estos residuos, recomendando reducir la cantidad y nocividad de los residuos de envases, se limitaban la cantidad de bolsas de un solo uso al 50% y proponía establecer un calendario para la sustitución de plásticos no biodegradables y prohibir su utilización progresiva a partir del 2010. Varios años después, aún seguimos utilizando este tipo de plásticos provenientes de fuentes no renovables, pero esto puede y debe cambiar.

A diferencia de los polímeros convencionales, el PLA es biodegradable e independiente de aquellos recursos no renovables como el petróleo, ya que se obtiene de recursos agrícolas renovables. Por tanto esta ventaja implica la disminución de volúmenes de residuos sólidos. Al final del ciclo de vida de un producto basado en PLA, este puede descomponerse en sus partes más simples de manera que no quede ninguna señal del producto original.

Si nos centramos en el mercado de los polímeros biodegradables, el PLA, en el año 2009, ocupaba el 90% del consumo mundial con 659000 toneladas. Esta cuota pasa desapercibida si lo comparamos con el consumo de plásticos a nivel mundial, ya que solo representa el 1% aproximadamente.

Con la impresión 3d se ha abierto una nueva vía para el desarrollo y la comercialización del PLA y la tendencia a sustituir nuestros productos por unos más respetuosos con el medio ambiente. Esto hizo que en china pasaran de una producción de 80.000 toneladas

de PLA en 2007 frente a las 150.000 en el 2009 ya que el mercado asiático abastece al resto del mundo en gran medida.

Otra factor que nos puede hacer decantarnos por el PLA, además de su resistencia mecánica, es la comparación del consumo con otros materiales. Resulta interesante compararlo respecto a la energía necesaria para fabricarlo, el agua usada y las emisiones que produce un kilo de material. (Fig. 76).

Material	Agua consumida	Energía	Emisiones CO ₂
PLA	62.67 l	7.39 KWh	240 gr
PP	39 l	9.25 KWH	1530 gr
PET	56.24 l	10.17 KWH	2520 gr
EPS	155.21 l	11.17KWh	2250 gr

Fig. 76. Comparación de consumo PLA vs plásticos varios. Fuente: PFC Antonio Relañó

Además el PLA, es el más sencillo de imprimir con diferencia ya que no recoge los fenómenos descritos anteriormente como warping, ni cracking. No le afecta las corrientes de aire durante la impresión, esto es favorable ya que podemos estar trabajando con PLA en lugares con buena ventilación ya sea natural o forzada, sin tener preocupaciones sobre el comportamiento del mismo, diferenciándose del ABS que, por el contrario, al fundirlo desprende gases nocivos para la salud. El PLA no necesita base de impresión calefactada, lo que también supone un ahorro energético frente a otros materiales que si necesitan.

¿Cómo podemos aplicar estos materiales y técnicas a la arquitectura?

Siempre que construimos un proyecto arquitectónico, produce un impacto en el medioambiente, ya sea por los procesos de fabricación de los materiales, por el transporte o por la puesta en obra entre otros; obra que normalmente genera una gran cantidad de residuos. ¿No deberíamos de evolucionar hacia sistemas con menos residuos y mejores para el medio ambiente?

Existen una gran cantidad de programas que nos permiten realizar geometrías muy complejas, pero que hasta ahora, debido a los métodos de construcción actuales, es difícil de conseguir.

El futuro de la arquitectura deberá de evolucionar a unos métodos de construcción más exactos, con menos errores en la producción. Con la impresión 3d, podríamos lograr resultados 100% exactos, disminuyendo en gran medida la producción de residuos, de producción local y que, al cabo de unos años, cuando se acabe la vida útil del edificio, se pueda reciclar 100%. En el caso de no ser reciclado, si construimos con polímeros provenientes de recursos naturales, biodegradables, se degradará con el paso del tiempo con un menor impacto para el planeta, y esta, debe de ser nuestra mentalidad como próximos creadores de espacios y formas de vida.

No nos referimos a la prefabricación de los productos a colocar en obra, nos referimos a que se podría tener la propia fabricación en obra, si en la misma situamos dispositivos como las impresoras 3d. Estas impresoras, vista la rápida evolución de la tecnología y los volúmenes de impresión que están consiguiendo (cada vez mayores) pueden llegar a desarrollarse hasta un punto tal que puedan imprimir una vivienda de una única pieza de 0 a 100. ¿Os imagináis como sería, el mismo sistema de fabricación pero evolucionado y multiplicado su escala? Me imagino un sistema de impresión, que pudiera ser trasladado fácilmente y llevado hasta el lugar de construcción y, una vez allí, después de sus ajustes y calibración, comenzar a imprimir y trabajar 24 horas/día. Los plazos de entrega de estos proyectos se verían reducidos considerablemente.

La implementación de los plásticos mediante impresión 3d en arquitectura, no es para nada descabellada, ya que si tenemos en cuenta los estudios realizados sobre las propiedades mecánicas de otros elementos de construcción tradicionales como son los ladrillos cerámicos, la resistencia de estos oscila entre 13.36 a 65 kg/cm². Estos datos indican que con plásticos, podemos alcanzar la misma resistencia y incluso superar los valores obtenidos de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. El máximo valor obtenido, ha sido con PLA_M con una resistencia a compresión de 97,20 Kg/cm².

Un punto desfavorable para la aplicación de los plásticos con impresión 3d en arquitectura, ya conociendo su comportamiento estructural, es la resistencia al fuego. Por tanto, actualmente este tipo de arquitecturas solo se podrían concebir si son efímeras o temporales. Si en el proceso de fabricación de estos plásticos, se le pudiera añadir resistencia al fuego una vez impreso, las aplicaciones podrían multiplicarse. Es una tecnología en desarrollo, pero si sigue evolucionando como hasta ahora, podrían tener grandes aplicaciones en un futuro inmediato en arquitectura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Schwab K. La cuarta revolución industrial [Internet]. [cited 2018 Jun 30]. Available from: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BRonDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=revolucion+industrial+impresion+3d&ots=IqWaFygCXv&sig=4uXj_qAZ39H6JeuZ0Q551Z8X6w8#v=onepage&q=impresion+3d&f=false
2. RepRap/es - RepRap [Internet]. [cited 2018 Jun 30]. Available from: <https://reprap.org/wiki/RepRap/es>
3. Lebreton L, Slat B, Ferrari F, Sainte-Rose B, Aitken J, Marthouse R, et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Sci Rep [Internet]. 2018 Dec 22 [cited 2018 Jul 1];8(1):4666. Available from: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-22939-w>
4. Benitez A. Acido Poliláctico: Un plástico biodegradable a partir del almidón.pdf. In: Artículo científico.
5. DUS Architects builds 3D-printed micro home in Amsterdam [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.dezeen.com/2016/08/30/dus-architects-3d-printed-micro-home-amsterdam-cabin-bathtub/>
6. Mathilde Berchon y Bertier Luyt. La impresión 3d : Guia definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general. Gili EG, editor. 2016-01-01;
7. Stratasys|Impresión 3D y fabricación aditiva [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <http://www.stratasys.com/es/>
8. Hubs 3d, editor. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 2017;
9. Nación Pirata. Proyecto social - Proyecto Supergiz [Internet]. Available from: <https://www.nacionpirata.com/nacion-pirata/proyectoprotesis3d/>
10. FILAFLEX [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: https://recreus.com/es/blog/10_moda-y-tecnologia-de-la-mano-de-filaflex.html
11. Facade of Dutch EU building uses 3D-printed bioplastic [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.dezeen.com/2016/01/12/european-union-3d-printed->

facade-dus-architects-holland/

12. Materiales que se pueden utilizar para imprimir en 3D [Internet]. [cited 2018 Jun 30]. Available from: <http://anonymous-projects.com/materiales-que-se-pueden-utilizar-para-imprimir-en-3d/>
13. Campillo M. Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón. Escuela técnica superior de arquitectura de madrid. 2017;
14. Flores HJM. Ventajas Y Desventajas De Las Impresoras 3D. Rev TECNOLÓGICA [Internet]. 12:30–4. Available from: http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rtft/v12n18/v12n18_a06.pdf
15. Filamentos impresora 3D Filamentos Pla ABS Hips - Smart Materials 3D [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://smartmaterials3d.com/es/>
16. FFF world: Filamento 3D para impresión 3D FFF. Filamento PLA, ABS, PETG, TPE, PVA, POM, HIPS y PC - FFF World [Internet]. [cited 2018 Jun 30]. Available from: <https://www.fffworld.com/es/>
17. Ultimaker. PVA: Water-soluble support for complex models [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://ultimaker.com/en/products/materials/pva>
18. Thiebaut C. Universidad Carlos III de Madrid. Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida. PROYECTO FIN DE CARRERA. INGENIERÍA INDUSTRIAL. 2005;1–2. Available from: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2540229&orden=230343&info=link>
19. Auras R. Poly(lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications. Rafael auras loong talk lim , susam em selkee and hideto tsu, editor. Wiley; 2010. 499 p.
20. Filamento PLA Tech Blanco 1.75 mm 1 kg. [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.fffworld.com/es/filamento-3d-filamento-pla/200-pla-tech-blanco-175-1kg-0607376933194.html>
21. smartmaterials3d. SMARTFIL® PLA [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://smartmaterials3d.com/es/smartfil-pla/66-smartfil-pla-antracite.html>
22. ABS | Textos Científicos [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>
23. GUÍA DE FILAMENTOS | LEON3D [Internet]. [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.leon-3d.es/guia-de-filamentos/>
24. hanser publishers, editor. Osswald, Menges Material Science of Polymers for Engineers. JESÚS CABRERA RUIZ. TFG. EVALUACIÓN MECÁNICA DE POLÍMEROS ECOLÓGICOS

hanser.

25. Filamento material HiPS Poliestireno Alto Impacto | Filament2Print [Internet]. [cited 2018 Jun 29]. Available from: <https://filament2print.com/es/186-hips>
26. PLA filamento 1.75 mm | BQ [Internet]. [cited 2018 Jun 27]. Available from: <https://www.bq.com/es/pla>
27. Felipe J, Vergel T. Caracterización de la resistencia mecánica a tensión del Ácido poliláctico por manufactura aditiva mediante fabricación por filamento fundido (FFF). Universidad santo tomás. División de ingeniería mecánica. Bogotá. 2017;
28. Norma española, UNE-EN ISO 527-2. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión. Noviembre 2012;
29. Ultimaker Cura: Advanced 3D printing software, made accessible [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>
30. Consejos de impresión en 3D con tecnología FFF (2ª parte) [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <http://www.dima3d.com/consejos-de-impresion-en-3d-con-tecnologia-fff-2a-parte/>
31. Kit Prusa i3 Original con LCD de 1.75mm.
32. Kit de extrusión HeatCore DDG | BQ.
33. El Hotend - Funcionamiento y Componentes - HTA3D - HTA3D.
34. Consejos para imprimir en 3D: menos velocidad para más calidad [Internet]. [cited 2018 Jun 21]. Available from: <https://trimaker.com/consejos-imprimir-3d-velocidad/>
35. GUÍA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN IMPRESIÓN 3D | LEON3D [Internet]. [cited 2018 Jun 22]. Available from: <https://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/>

Referencias bibliográficas:

- Nelson Afanador Garcia GGG y R monroy sepúlveda. Propiedades Físicas Y Mecánicas De Ladrillos Macizos Cerámicos Para Mampostería. Igarss 2014. 2014;22(1):1–5.
- Un planeta impreso en 3D | Tecnología | EL PAÍS [Internet]. [cited 2018 Jun 30]. Available from: https://elpais.com/tecnologia/2017/04/12/actualidad/1491997087_430446.html
- Gómez González S 1974-. Impresión 3D. Marcombo; 2016.